



University of West Bohemia in Pilsen
Department of Computer Science and Engineering
Univerzitní 8
30614 Pilsen
Czech Republic

Haptická vizualizace objemových dat

Petr Vaněček

Technical Report No. DCSE/TR-2010-10
December, 2010

Distribution: Public

Technical Report No. DCSE/TR-2010-10
December 2010

Haptická vizualizace objemových dat

Petr Vaněček

Abstract

This technical report describes the fundamentals of haptic rendering of volumetric data. It also gives a light overview of existing haptic devices and three haptic libraries – Sensable OpenHaptics, Chai3D and HAPI.

This work was supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic under the research program LC-06002 (Virtual).

Copies of this report are available

<http://www.kiv.zcu.cz/publications/>

by surface mail on request sent to the following address:

University of West Bohemia in Pilsen
Department of Computer Science and Engineering
Univerzitní 8
30614 Pilsen
Czech Republic

Copyright ©2010 University of West Bohemia in Pilsen, Czech Republic

Obsah

1	Úvod	3
2	Haptická zařízení	3
2.1	SensAble	4
2.2	Force Dimension	5
2.3	Novint	5
2.4	MOOG	5
2.5	Haption	6
3	Haptická rozhraní	6
3.1	Abstraktní vrstvy	6
3.1.1	Vrstva ovladačů	6
3.1.2	Nízkoúrovňový přístup	7
3.1.3	Vysokoúrovňový přístup	7
3.2	Běžně dostupná API	7
3.2.1	OpenHaptics	7
3.2.2	Chai 3D	9
3.2.3	HAPI a H3DAPI	10
4	Možnosti haptické vizualizace	11
4.1	Skalární data	11
4.1.1	Geometricky orientovaný přístup	11
4.1.2	Přímá vizualizace	12
4.1.3	Hybridní přístup	14
4.2	Vektorová data	15
4.2.1	Orientace pole	16
4.2.2	Vedení proudnicemi	16
4.2.3	Řízení lokálními vlastnostmi	16
4.3	Haptická primitiva	17
4.3.1	Skládání primitiv	18

5 Závěr	19
A Přílohy	22
A.1 Zařízení Phantom Omni	22

1 Úvod

Vědecká vizualizace je v současnosti jednou z hlavních aplikací virtuální reality. Vývoj v oblasti grafického hardwaru v posledních letech umožňuje zobrazování a práci se stále složitějšími a rozsáhlejšími daty v reálném čase, což poskytuje nové možnosti v mnoha oblastech lidské činnosti (zdravotnictví, průmysl, fyzika. . .). Často je třeba analyzovat rozsáhlá, mnohorozměrná data, která jsou výstupem různých měření či simulací. Vizualizace objemových dat se proto v posledních letech stává nepostradatelným nástrojem. Vývoj dostatečně flexibilních nástrojů pro analýzu, filtraci a zobrazování takovýchto dat je proto aktuálním tématem počítačové grafiky.

S rostoucí složitostí a množstvím zobrazovaných dat je i s využitím kvalitních nástrojů problém rychlé orientace a porozumění. Mnoho studií dokazuje, že přidání dalších smyslových kanálů (např. hmatového - haptického) pomáhá uživateli lépe proniknout do analyzovaných dat a může vézt k podstatnému urychlení a zpřesnění práce.

Typické využití haptické interakce v nejrůznějších aplikacích je založeno na předpokladu existence nějakého povrchu. Zpětná vazba (hmatový vjem) má pak za cíl simulovat interakci s tímto povrchem tak, jak jsou lidé zvyklí. Naproti tomu objemová haptická vizualizace se snaží zprostředkovat hmatový vjem bez explicitního povrchu (odhlédneme-li od možnosti zobrazování isoploch v těchto datech, což v tuto chvíli není naším cílem).

V této technické zprávě je shrnut současný stav metod pro haptickou vizualizaci objemových dat a vymezeny problematické oblasti, které skýtají dostatek prostoru pro další výzkum. V kapitole 2 je uveden stručný přehled haptických zařízení a jejich výrobců. Následující kapitola 3 pak popisuje nejběžnějších haptická rozhraní a jejich vlastnosti. Kapitola 4 obsahuje přehled metod pro haptickou vizualizaci skalárních a vektorových objemových dat.

2 Haptická zařízení

Jedním z podstatných kritérií podle kterých lze rozdělit haptická zařízení je počet pasivních (vstupních) a aktivních (výstupních) stupňů volnosti. U většiny zařízení je počet aktivních stupňů volnosti, tedy počet aktivních zpětnovazebních prvků, menší, než počet pasivních stupňů volnosti, tedy snímačů. Častou kombinací u zařízení, která jsou rozumně dostupná (do 500 tisíc Kč) jsou 3 aktivní stupně volnosti pro zpětnou vazbu na pozici a k nim navíc tři pasivní stupně volnosti pro natočení zařízení.

Dalším kritériem, které je třeba brát při výběru vhodného haptického zařízení

v potaz, je velikost pracovního prostoru. Ta se obvykle pohybuje v desítkách centimetrů.

Posledním podstatným kritériem jsou fyzická omezení zařízení (mechanická i elektronická), která jednak určují velikost síly, kterou je schopné zařízení působit na uživatele (typické hodnoty jsou desítky N na posun a řádově stovky mNm na torzi).

V dalších podkapitolách se budeme zabývat pouze zařízeními, které mají alespoň 3 aktivní stupně volnosti. Tím nám z textu vypadnou různá komoditní zařízení jako joysticky či volanty, která jsou určena především pro herní průmysl. Rovněž nebudeme uvažovat různé exoskeletony jako např. CyberGrasp, či nově připravovaný, nízkonákladový Novint XIO.

Protože zbylá zařízení nepatří ve většině případů mezi běžně prodávaná zařízení, jsou ceny často pouze na vyžádání. Tabulka 1 uvádí alespoň orientační ceny a vlastnosti zařízení, které bylo možné dohledat na internetu. Poměrně trefné vyjádření k cenám haptických zařízení uvádí Iman Brouwer [?] na svých stránkách: „Většina haptických zařízení se cenově nachází někde mezi Toyotou Echo a Porche“.

2.1 SensAble

Americká firma SensAble nabízí poměrně širokou paletu haptických zařízení, z nichž nejlepší řada nabízí 7 aktivních stupňů volnosti. Všechna zařízení mají podobnou konstrukci, kdy samotný haptický ukazatel ve tvaru pera je zavěšen na ramenu se dvěma klouby.

Nejmenším a také nejlevnějším zařízením je PHANTOM Omni, což je malé zařízení se 3 aktivními stupni volnosti a celkově 6 stupni volnosti. Cenově se toto zařízení pohybuje pod hranicí 40 tisíc Kč. Další zařízení této firmy ze série Desktop, která nabízí vyšší přesnost, větší pracovní prostor a větší silovou odezvu začínají cenově na 200 tisících Kč. Profesionální zařízení řady Premium, která nabízejí mnohem větší pracovní prostor se s výjimkou modelu 1.0 cenově pohybují nad 1 milion Kč.

Řada Premium 6DOF nabízí 6 a nově dokonce 7 aktivních stupňů volnosti. Ceny těchto zařízení jsou k dispozici pouze na vyžádání.

Všechna zařízení firmy SensAble jsou založena na modelu impedance control (position-in/force-out). Haptická smyčka tedy vypadá tak, že se nejdříve zjistí aktuální pozice haptického ukazatele a následně se vypočítá a aplikuje odpovídající síla zpět na rameno.

Díky široké cenové i kvalitativní nabídce je v současnosti firma SensAble považována za průmyslový standard v haptických zařízeních. Pro svá zařízení vy-

víjí rozhraní OpenHaptics a je významným partnerem při vývoji rozhraní HAPI/H3DAPI. Podpora zařízení je i v rozhraní Chai3D.

2.2 Force Dimension

Švýcarská firma Force Dimension vsadila na zcela jinou konstrukci. Všechna její zařízení jsou ke svislé základně chycena třemi rameny a podle jejich ohýbáním či narovnáváním se přenáší na zařízení translační síla. V případě zařízení se 6 aktivními stupni volnosti je rotace řešena zcela nezávisle na pozici.

Nejlevnější zařízení z produktové řady Omega se cenově pohybuje na hranici 300 tisíc Kč. Kvalitativně vyšší řada Delta pak nabízí jak zařízení se 3 aktivními stupni volnosti (500 tisíc Kč), tak zařízení se 6 aktivními stupni (900 tisíc Kč). Nejnovější řada Sigma (listopad 2010) nabízí 7 aktivních stupňů volnosti a větší torzní sílu. Cenu se nepodařilo zjistit.

Podobně jako u firmy SensAble jsou zařízení založena na modelu impedance control. Pro svá zařízení vyvíjí společnost vlastní haptické SDK (Haptic SDK), která je úzce propojena s knihovnou Robotic SDK (robotická divize Force Dimension). Část lidí z Force Dimension stojí za knihovnou Chai 3D. Zařízení mají přímou podporu v rozhraní HAPI.

2.3 Novint

Na podobnou konstrukci jako firma Force Dimension vsadila i firma Novint. Ta se však cenově zaměřila na hráčskou komunitu a její zařízení Falcon [MH09] se cenově pohybuje kolem 4 tisíc Kč. V poměru cena/výkon se tak jedná o zajímavé zařízení.

Kromě vlastních knihoven určených především pro herní průmysl (F-Gen SDK) má zařízení podporu i v rozhraních Chai 3D a HAPI.

2.4 MOOG

Holandská pobočka firmy MOOG Inc. (dříve samostatná společnost FCS) vsadila u svého zařízení HapticMaster [LLFR02] na opačný přístup - admittance control (force-in/position-out). Zařízení snímá sílu, jakou uživatel působí na koncový bod a na základě ní nastaví novou pozici. Tento způsob umožňuje využití robustnější mechanické konstrukce a tím dosahuje podstatně větších sil.

Kromě vlastní haptické knihovny FCS Haptic API má zařízení podporu v HAPI.

2.5 Haption

Francouzská firma Haption nabízí širokou škálu haptických zařízení. Do námi sledované kategorie patří zařízení řady Virtuose, která ve vyšších řadách vynikají především velkou torzní silou.

Firma vyvíjí vlastní sadu haptických API – nízkoúrovňové Virtuose API a vysokoúrovňové IPSI API. Navíc je k dispozici plná integrace haptického zařízení do několika programů jako např. Catia či SolidWorks. Zařízení však podle všeho nejsou podporována ani knihovnou Chai3D, ani HAPI.

3 Haptická rozhraní

3.1 Abstraktní vrstvy

Haptická zařízení jsou poměrně složitá a pro korektní haptickou zpětnou vazbu je nutné obnovovat stav zařízení mnohokrát za vteřinu (nemělo by klesnout pod 1kHz). Podobně jako v případě jiných zařízení je i u haptiky možnost ovládat zařízení na různých úrovních abstrakce - od nejnižší úrovně v podobě přístupu k systémovým ovladačům zařízení, až po tu nejvyšší, která bývá založena na popisu scény a chování jednotlivých objektů, většinou v podobě nějakého grafu scény. Volba správné úrovně abstrakce pro konkrétní aplikaci může zjednodušit a urychlit vývoj finálního produktu.

3.1.1 Vrstva ovladačů

Nejnižší vrstva pomocí které může běžný programátor komunikovat se zařízením je vrstva ovladačů operačního systému. Na této úrovni je nutné postarat se o korektní inicializaci zařízení, navázání a uzavření komunikace a přepočítání vstupních/výstupních dat pro získání pozice haptického zařízení a nastavení odpovídajících sil.

Tato vrstva poskytuje nejrychlejší a nejjobecnější přístup, na druhou stranu vyžaduje mnoho úsilí k tomu, aby zařízení vůbec začalo pracovat. Druhou podstatnou nevýhodou je skutečnost, že každé zařízení má vlastní ovladač a výměna zařízení za jiný typ tak většinou znamená kompletní přepsání kódu.

Vydávat se touto cestou má smysl pouze v okamžiku, kdy použití vyšších abstraktních vrstev z nějakého důvodu nestačí (např. modifikace standardního chování) a nebo tehdy, když vyšší abstraktní vrstva nepodporuje dané zařízení - v tomto případě stojí za zvážení, zda nenapsat rozhraní mezi ovladačem a vyšší abstraktní vrstvou a následně využívat její funkcionalitu.

3.1.2 Nízkoúrovňový přístup

Na rozdíl od ovladače, u kterého musí programátor sám zajistit korektní výpočet pozice a nastavení síly, nízkoúrovňové API umožňuje přímou komunikaci se zařízením prostřednictvím pozice, natočení či vektorů síly. Nízkoúrovňová API jsou často koncipována obecněji a umožňují tak výměnu jednoho zařízení za jiné, aniž by muselo dojít k přepisování rozsáhlé části kódu. Přístup API k zařízení lze rozdělit do dvou kategorií na blokující a neblokující. V prvním případě se při čtení pozice zařízení zastaví volající vlákno a čeká, než se hodnoty zařízení načtou. Ve druhém případě se při inicializaci zařízení zaregistruje callback funkce, kterou ovladač buď v pravidelných intervalech nebo při změně stavu.

Ať už se jedná o přístup blokující či neblokující, typická haptická aplikace obsahuje haptickou smyčku, ve které se zjistí/přečte stav zařízení, vypočítají se síly, které mají působit na uživatele a aplikují. Je nutné mít v paměti fakt, že pro dosažení reálného haptického vjemu musí haptická smyčka běžet alespoň na 1kHz.

3.1.3 Vysokoúrovňový přístup

Vysokoúrovňové API obaluje základní výpočty sil do vyšších logických celků jako jsou objekty, vlastnosti materiálů, apod. Vysokoúrovňová API se často inspiroují v grafických API (OpenGL). Nad vysokoúrovňovým API je pak často k dispozici graf scény, který popisuje jak vizuální, tak haptické vlastnosti jednotlivých částí scény. To podstatně zrychluje vývoj haptické aplikace a vytvoření jednoduché scény je tak otázkou několika minut.

3.2 Běžně dostupná API

V této části jsou stručně popsány vlastnosti běžně dostupných API pro haptickou vizualizaci a jejich základní vlastnosti. Výčet API není zdaleka kompletní, byla vybrána taková API, která jsou živá a na dostatečné úrovni dokončení.

3.2.1 OpenHaptics

Součástí technického vybavení Centra počítačové grafiky a vizualizace je zařízení Phantom Omni od firmy SensAble. Z tohoto důvodu je proprietární knihovně OpenHaptics věnována tato podkapitola. Knihovna OpenHaptics je komerční SDK navrženo pouze pro zařízení firmy SensAble, pro akademické využití je k dispozici akademická licence. Bližší informace o API lze nalézt na stránkách firmy SensAble a v programátorské dokumentaci [SENS08].

Knihovna spolu s ovladači je rozdělena do následujících vrstev:

- QuickHaptics - Objektově orientované micro API s vysokou mírou abstrakce.
- Haptic Library API (HLAPI) - Vysokoúrovňová vrstva.
- Haptic Device API (HDAPI) - Nízkoúrovňová vrstva.
- Phantom Device Drivers (PDD) - Vrstva ovladačů pro jednotlivá zařízení. Programátor k ní nemá přímý přístup.

QuickHaptics se snaží obalit jednotlivé kroky nutné pro typickou haptickou aplikaci do hierarchie tříd, což umožňuje velmi jednoduchý a rychlý vývoj jednoduchých haptických aplikací. Běžné akce, které je nutné při psaní haptické/grafické aplikace provést jsou následující:

- inicializace grafického okna
- inicializace haptického zařízení
- načtení dat ze souboru
- nastavení scény a kamery
- namapování haptických vlastností na objekty
- zaregistrování callback funkcí pro umožnění interakce

Rozhraní obsahuje 4 základní třídy pro vytvoření okna, definování haptického zařízení a jeho pracovního prostoru, definování objektů a definování haptického ukazatele. Pro jednodušší použití mají všechny tyto třídy přednastavené výchozí parametry a pro vytvoření aplikace tak stačí pouhých 8 řádek kódu. Při psaní složitějších aplikací je možné využít služeb některé z nižších vrstev.

HLAPI je vysokoúrovňová knihovna, která je svým návrhem velmi podobná knihovně OpenGL. V API lze specifikovat geometrická primitiva (trojúhelníky, úsečky a body), kterým lze přiřadit haptické vlastnosti. Propojení HLAPI a OpenGL jde dokonce tak daleko, že definice primitiv probíhá shodnými příkazy jako v případě immediate kódu OpenGL (glVertex*), display listů, či polí vrcholů.

HLAPI poskytuje celkem 3 způsoby jak generovat sílu:

- Tvar – umožňuje specifikovat geometrická primitiva a následně automaticky generuje sílu při kontaktu s povrchem.

- Efekt – umožňuje specifikovat globální silovou funkci v případě, kdy situaci nelze popsat primitivem. Typickým příkladem je viskozita či pružina.
- Proxy objekt – umožňuje nastavit proxy objekt do požadované polohy a automaticky dopočítá síly, které působí směrem k proxy objektu.

HDAPI je v podstatě nejnižší vrstva, ke které se lze dostat jednoduchým způsobem. Knihovna nabízí základní funkcionalitu v podobě inicializace zařízení, získání a nastavení stavů zařízení (pozice, tlačítka, síla, ...) a navíc zajišťuje běh haptického vlákna a jeho synchronizaci s aplikací. To se děje jednak pomocí asynchronních zpětných volání, jednak pomocí konceptu haptického rámce (haptic frame), v rámci kterého je zajištěna konzistence všech stavů zařízení. Vzhledem k poměrně vysoké rychlosti haptické smyčky (min. 1000Hz) je čtení či nastavování stavů mimo haptický rámec riskantní.

Veškeré výpočty interakcí haptického ukazatele s virtuálním světem a nastavení odpovídajících sil musí programátor spočítat a nastavit odpovídající stavy zařízení.

3.2.2 Chai 3D

Chai 3D je API postavené nad grafem scény. API je k dispozici jak ve volně šiřitelné verzi, tak ve verzi komerční. Přestože se jedná o API vyvíjené komunitou programátorů, v pozadí tohoto projektu stojí firma Force Dimension, což poskytuje API jistou záruku stability. Nejedná se však o API, které by obsahovalo řadu složitých funkcí, jedná se spíše o jednodušší API se zaměřením na snadné propojení vizuální a haptické prezentace. Kromě zařízení firmy Force Dimension podporuje Chai 3D nativně i zařízení firmy SensAble a Novint.

Nízkoúrovňový přístup, který Chai 3D nabízí, umožňuje základní operace jako získání pozice, nastavení sil či inicializaci zařízení a ukončení komunikace. Výhodou API je to, že ke všem zařízením pomocí generického ovladače, což podstatně usnadňuje použití jiného haptického zařízení, než pro který byla aplikace vyvíjena.

Graf scény obsahuje hierarchicky uspořádané informace o světě. Výhoda tohoto přístupu spočívá především ve snadné modifikaci skupiny uzlů (typicky nastavení vlastností rodiče může ovlivnit nastavení vlastností u dětí).

Haptický nástroj je jedním z uzlů grafu scény, který reprezentuje haptické zařízení (v současné verzi je podpora pouze pro 3-DOF). Protože knihovna Chai 3D využívá pro výpočet sil proxy objekty, je i grafická reprezentace haptického zařízení rozdělena na dvě komponenty – skutečné zařízení a proxy.

Haptické efekty slouží podobně jako v případě HLAPI k popisu jevů, které nelze snadno popsat kontaktem s geometrickým tělesem. Patřím sem takové jevy

jako vibrace, magnetismus či viskozita.

Rozšiřující moduly jsou díky architektuře Chai 3D API dobře integrovány do grafu scény. Mezi dva důležité moduly patří ODE modul pro práci s fyzikálním modelem a GEM pro práci s deformovatelnými objekty.

3.2.3 HAPI a H3DAPI

HAPI je komplexní vysokúrovňové API, které je vyvíjeno firmou SensGraphics a je k dispozici jako pod otevřenou licenci, tak pod licenci uzavřenou. V pozadí vývoje této knihovny stojí firma SensAble a kromě jejích zařízení jsou podporována i zařízení firem Force Dimension, Novint či MOOG FCS.

API disponuje hned čtyřmi různými haptickými algoritmy: God-object, Ruspini (proxy-based), Chai 3D a OpenHaptics. Kromě základních haptických operací nabízí HAPI široké množství funkcí, jako haptické efekty, efekty na povrchu těles či detekce kolizí. Inspirace rozhraním HLAPI firmy SensAble je patrná ze způsobu, jakým lze zadávat povrchy. Stejně jako v případě HLAPI, i zde je možnost definovat geometrii stejným kusem kódu, jako pro grafickou reprezentaci pomocí knihovny OpenGL.

H3D je vysoce flexibilní graf scény postavený nad knihovnou HAPI a OpenGL. Celá filosofie H3D je postavena na uzlech, které zajišťují požadovanou funkcionalitu. Jedná se o třívrstvou architekturu, kdy na nejnižší úrovni stojí popis funkčních jednotlivých uzlů. Vzhledem k požadavkům na rychlost je tato vrstva psána v jazyce C++. Pokud je požadována funkcionalita již obsažena v knihovně nebo je do API dodán nově vytvořený uzel v podobě dynamické knihovny, lze použít jazyk Python, který funkčně provádí jednotlivé uzly. Nejvyšší vrstva je pak vlastní popis grafu scény pomocí rozšířeného formátu X3D. Součástí popisu grafu scény je nejen grafická podoba, ale i haptické vlastnosti objektů.

Toolkity jsou sady uzlů rozšiřující výchozí funkcionalitu H3D. Mezi nejvýznamnější toolkity patří Volume Haptics Toolkit, který je zaměřen na vizualizaci objemových dat. Dalším, snad ještě významnějším toolkitem je MedX3D, který se zaměřuje na lékařská data. Uzly obsažené v tomto toolkitu umí například načíst data ve formátu DICOM, zobrazovat jak hapticky, tak graficky objemová data. Součástí knihovny je i sada stylů, které lze aplikovat na objemová data. Posledním toolkitem, který stojí za zmínku je UI, který obsahuje sadu uzlů pro vytváření uživatelského prostředí.

Součástí API je X3D prohlížeč, který umí načíst graf z X3D souboru a zobrazit jej. S pomocí vhodně vytvořených uzlů tak lze i relativně složité aplikace vytvořit pouze pomocí xml, případně jednoduchých skriptů v jazyce Python.

4 Možnosti haptické vizualizace

Pro haptickou vizualizaci objemových dat lze využít mnoho různých metod. Jejich výběr závisí na typu vstupních dat (skalární, vektorová, tenzorová, vícerozměrná), na aplikaci (nalezení extrémů, celkový přehled), ale i na možnostech výstupního zařízení (síla, točivý moment...).

4.1 Skalární data

Trojrozměrná skalární data, kterými mohou být např. hustota, teplota, tlak či skalární funkce vektorových hodnot (velikost, divergence...), jsou častým výstupem různých měřících metod, ale i simulačních metod. V počítačové grafice lze taková data zobrazovat buď některou z metod pro přímé zobrazování (direct volume rendering) nebo nejprve extrahovat isoplochy a ty následně zobrazovat. Podobně lze k vizualizaci takovýchto dat přistupovat i z pohledu haptiky.

Způsoby haptické vizualizace lze tak podle přístupu rozdělit do následujících kategorií:

- geometricky orientovaný přístup
- přímá vizualizace
- hybridní přístup

V následujících podkapitolách budou jednotlivé kategorie vysvětleny.

4.1.1 Geometricky orientovaný přístup

Základním stavebním kamenem u geometricky orientovaného přístupu je geometrie (většinou množina trojúhelníků, či méně často mnohoúhelníků), pomocí které je definován povrch. V případě objemových dat lze povrch získat některou z metod pro extraci isoploch ([LC87]).

Následně lze využít některý ze standardních přístupů pro haptickou vizualizaci povrchů. Asi nejčastějším způsobem je využití virtuálního haptického bodu (god object [ZS95]). Tento přístup je založen na skutečnosti, že uživatel se může pohybovat kdekoliv v pracovním prostoru haptického zařízení a nelze zcela zabránit průniku haptického bodu (probe) dovnitř některého z těles. Pokud se uživatel pohybuje mimo objekt, je reálný a virtuální haptický bod shodný. V okamžiku kdy uživatel pronikne do tělesa, oddělí se reálný haptický bod od virtuálního, který zůstává na nejbližším místě na povrchu tělesa. Metoda může být dále vylepšena

využitím proxy objektu s konečným poloměrem (namísto bezrozměrného virtuálního haptického bodu) [RKK97]. Toto vylepšení zlepšuje numerickou stabilitu, protože nemůže tak snadno dojít k průniku virtuálního bodu dovnitř tělesa.

Výsledná síla působící na haptické zařízení je dána směrem a vzdáleností reálného haptického bodu od bodu virtuálního, pomocí tlumeného kmitání virtuální pružiny:

$$\vec{F}_{fb} = -k(\vec{x}_{probe} - \vec{x}_{proxy}) - D(\vec{v}_{probe} - \vec{v}_{proxy}), \quad (1)$$

kde k je koeficient pružnosti, D je koeficient útlumu, $\vec{x}_{probe/proxy}$ je poloha reálného/virtuálního haptického bodu a $\vec{v}_{probe/proxy}$ jeho rychlost. Protože se proxy objekt pohybuje po povrchu směrem k haptickému bodu, lze pomocí této metody simulovat i různá chování povrchu (tření, nerovnosti).

Výhody tohoto přístupu při vizualizaci objemových dat spočívají především ve snadné implementaci. V okamžiku kdy je vytvořena isoplocha, lze využít takřka jakékoliv stávající haptické API pro jeho vizualizaci. Další výhodou je pak stabilita výpočtu síly.

Hlavní nevýhodou je omezení zpětné vazby na jednu (několik) isoploch, namísto spojitého prozkoumávání dat. Další nevýhodou je pak závislost rychlosti na počtu mnohoúhelníků, z kterých je objekt složen – ten bývá u objemových dat vysoký a může tak dojít k poklesu snímkového kmitočtu v haptické smyčce.

4.1.2 Přímá vizualizace

Jak již bylo naznačeno v předchozí podkapitole, nevýhoda geometrické reprezentace spočívá v tom, že uživatel je omezen na jednu isoplochu. Vzhledem k náročnosti algoritmů pro extrakci isoploch je nemožné interaktivně generovat isoplochu v závislosti na pozici uživatele. Jistou možností je využití lokální extrakce isoplochy [KSW+99, CHS00].

To však neřeší problém s přechodem na konkrétní isoplochu. Uživatel musí nějakým způsobem vypnout haptickou interakci a znovu ji zapnout v okamžiku, kdy se nachází na požadovaném místě. Tento způsob ale není příliš intuitivní. Druhou možností je automatická změna isoplochy po překročení určité velikosti působící síly [IBHJ03]. I tento přístup má však svá úskalí, protože změna není plynulá a dochází „poskakování“ po jednotlivých úrovních.

Řešením toho problému je přímá objemová vizualizace, pomocí přímého mapování síly na základě polohy haptického bodu v datech, případně rychlosti pohybu haptického bodu pro simulaci viskozity. Návrhem vhodné funkce \vec{F} lze vypočítat sílu \vec{F} , která bude uživateli snadno srozumitelná.

Asi nejjednodušší metodou je přímé namapování gradientu na sílu [IN93, AS96]:

$$\vec{F}_{fb} = \tau(V(\vec{x}_{probe}))\vec{\nabla}V(\vec{x}_{probe}), \quad (2)$$

kde τ je přenosová funkce a V je skalární hodnota v daném bodě. Tato funkce působí na uživatele ve směru nejmenších/největších hodnot, v závislosti na znaménku přenosové funkce. Pro objemy, ve kterých se nevyskytují vysoké frekvence (rychlé změny měřené veličiny, šum), funguje funkce velmi dobře. Při výskytu vysokých frekvencí však dochází k vibracím zařízení, způsobených prudkou změnou amplitudy a/nebo směru působící síly. Řešením může být přidání tlumícího koeficientu, což ale vede ke snížení věrohodnosti vjemu.

Podobným způsobem lze snadno převést skalární hodnotu na viskozitu, kdy je rychlost haptického bodu vynásobena funkcí skalární hodnoty v bodě [AS96]:

$$\vec{F}_{fb} = \tau(V(\vec{x}_{probe}))\vec{v}_{probe}. \quad (3)$$

Nevýhodou tohoto přístupu je skutečnost, že velikost síly je závislá na rychlosti, s jakou uživatel prozkoumává data. V okamžiku, kdy zpomalí, aby některou část prozkoumal důkladněji, síla poklesne. Mapování viskozity je tak vhodné při rychlém hledání oblasti zájmu, nikoliv pro důkladné prozkoumávání specifické oblasti.

Druhou nevýhodou využití viskozity, jakožto zdroje pro zpětnou vazbu je její nesměrovost. Vylepšení proto může spočívat v kombinaci obou výše zmíněných postupů, kdy je viskozita řízena též směrem a velikostí gradientu [PL98]:

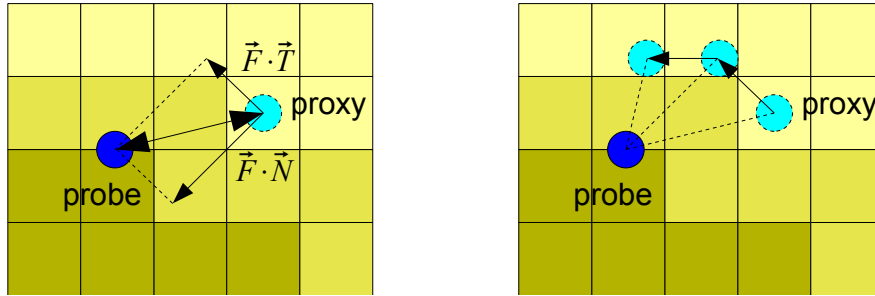
$$\vec{F}_{fb} = \tau(V(\vec{x}_{probe}))\frac{\vec{v}_{probe} \cdot \vec{\nabla}V(\vec{x}_{probe})}{|\vec{\nabla}V(\vec{x}_{probe})|}. \quad (4)$$

V tomto případě je pohyb mezi oblastmi se stejnou hodnotou bez působení zpětné síly. Pohyb po isoplochách tak neklade žádný odpor a pro uživatele je poměrně snadné a intuitivní takový povrch sledovat. I tady samozřejmě platí, že s klesající rychlostí klesá i výsledná síla.

Výhoda všech výše zmíněných metod spočívá v tom, že sílu lze dopočítat přímo ze zdrojových dat, bez nutnosti rozsáhlejšího preprocessingu. Speciálně pro vizualizaci kapalin se z uživatelského hlediska nejlépe osvědčila metoda založená na „gravitační síle“ [PL98, RBKB03]. U této metody je každému bodu objemu přiřazena hmotnost. Haptický bod je pak přitahován místy s vysokou hmotností a případně odpuzován místy s nízkou hmotností. Metoda je velmi vhodná a intuitivní při hledání extrémů v datech [RBKB03]. Potřebuje však pomocnou paměť pro výpočet gravitačního pole.

4.1.3 Hybridní přístup

Hlavní motivací pro návrh hybridního algoritmu byla možnost prozkoumávat data, která obsahují neproniknutelné tvrdé oblasti a zároveň, aby bylo možné simulovat měkké oblasti (typickým příkladem takových dat jsou CT snímky s tkáněmi) [LYG02]. Celá koncepce vychází z podobného přístupu, jaký je použit u geometricky orientovaných přístupů - tedy zavedení virtuálního haptického bodu a virtuální pružiny (rovnice 1). Aby však bylo možné „sledovat“ povrch, je nutné tuto sílu rozdělit na dva směry - směr kolmý k povrchu \vec{N} a směr tečný \vec{T} (obrázek 1 vlevo):



Obrázek 1: Vlevo: reálný a virtuální haptický bod je svázán virtuální pružinou, působící síla je rozdělená na sílu působící kolmo k povrchu isoplochy a sílu tečnou k povrchu. Vpravo: virtuální bod je přitahován k reálnému po povrchu isoplochy.

$$\vec{d} = \vec{x}_{probe} - \vec{x}_{proxy} \quad (5)$$

$$\hat{N} = \frac{\vec{\nabla}V(\vec{x}_{proxy})}{|\vec{\nabla}V(\vec{x}_{proxy})|} \quad (6)$$

$$\hat{T} = \frac{\vec{d} - \hat{N}(\vec{d} \cdot \hat{N})}{|\vec{d} - \hat{N}(\vec{d} \cdot \hat{N})|} \quad (7)$$

$$F_N = \vec{F} \cdot \hat{N} \quad (8)$$

$$F_T = \vec{F} \cdot \hat{T} \quad (9)$$

Virtuální haptický bod se pak v každém snímku pohne po povrchu, směrem k reálnému haptickému bodu. Protože se normála a tečna počítají lokálně pro každou buňku a v každém snímku, kopíruje virtuální haptický bod povrch (obrázek 1 vpravo):

$$\vec{x}'_{probe} = \vec{x}_{probe} + k\hat{T}F_T \quad (10)$$

Metoda má pochopitelně problémy, pokud je velikost lokálního gradientu blízká 0. Nejjednodušší navržené řešení je předdefinovaného normálového vektoru - v dalších rozšířeních metody pak nebude tato úprava potřeba.

Díky tomu, že je vektor síly rozložen na vektor působící v tečném směru k povrchu, lze poměrně jednoduchým a přímočarým způsobem nastavovat vlastnosti povrchu. Na základě velikosti síly působící proti povrchu F_N a vlastnostem povrchu μ lze vypočítat tření. To je následně využito jako práh, při jehož překročení dojde k pohybu virtuálního haptického bodu po povrchu. V opačném případě zůstane virtuální haptický bod na původním místě:

$$T_T = \mu F_N \quad (11)$$

$$\vec{x}'_{probe} = \begin{cases} \vec{x}_{probe} + \hat{T}(\vec{d} \cdot \hat{T} - T_T/k), & \text{jestliže } T_T < k(\vec{d} \cdot \hat{T}), \\ \vec{x}_{probe} & \text{jinak.} \end{cases} \quad (12)$$

Podobným způsobem lze kontrolovat i pohyb kolmo na povrch. Hodnota T_N (může být závislá na skalární hodnotě v bodě) určuje propustnost a je použita jako práh, při jehož překročení se virtuální haptický bod posune ve směru normály:

$$\vec{x}'_{probe} = \begin{cases} \vec{x}_{probe} + \hat{N}(\vec{d} \cdot \hat{N} - T_N/k), & \text{jestliže } T_N < k(\vec{d} \cdot \hat{N}), \\ \vec{x}_{probe} & \text{jinak.} \end{cases} \quad (13)$$

Výsledný výpočet pak probíhá tak, že nejprve se provede posun virtuálního haptického bodu ve směru normály (13) a následně se vypočítá tření a provede se posun virtuálního haptického bodu po povrchu (12). Nakonec se použije nově spočítaná pozice virtuálního haptického bodu pro výpočet zpětné vazby na haptické zařízení (1).

4.2 Vektorová data

Haptické renderování vektorových objemových dat je z hlediska mapování pro uživatele poněkud složitější. Stávající metody lze rozdělit podle přístupu na:

- vizualizace orientace pole,
- vedené proudnicemi (streamline),
- řízené lokálními vlastnostmi.

4.2.1 Orientace pole

Problematika vizualizace orientace pole je řešena poměrně málo [PL98]. Z velké části je to způsobeno především skutečností, že vizualizace orientace pomocí zařízení se 3 stupni volnosti není uživatelsky přívětivá a u zařízení se 6 stupni volnosti je naopak přímočará.

U zařízení se 6 stupni volnosti lze vnutit uživateli orientaci pole pomocí aplikace torzní síly na haptické zařízení tak, aby byla orientace ukazatele shodná s orientací pole. Velikost aplikované síly pak odráží velikost vektoru v daném bodě. Uživatel se může zcela svobodně pohybovat v objemu.

Pro zařízení se 3 stupni volnosti byla navržena metoda nulování torze [PL98], která využívá toho, že u většiny haptických zařízení drží uživatel ukazatel v jiném, než kde je aplikována síla. Posun haptického bodu tak má za následek rotaci ukazatele se středem v místě uchycení. Metoda nulování torze tedy aplikuje posun ukazatele v takovém směru, aby se natočení ukazatele srovnalo se směrem pole.

4.2.2 Vedení proudnicemi

Při vizualizaci vektorových polí se v počítačové grafice často využívají tzv. proudnice (streamline), což jsou trajektorie bodů virtuálních bodů v poli. Podobný princip lze využít i pro haptickou vizualizaci s tím, že trajektorie se bude počítat na základě pozice ukazatele v datech.

Asi nejjednodušší metoda vizualizace proudnic je založena pouze na aplikaci síly působící ve směru a velikosti dané odpovídajícím vektorem v poli [DMW+98]. Uživatel v kombinaci s vizuální informací získává obdobný pocit, jako když ponoří prst do tekoucí vody - pokud neklade žádný odpor, sleduje prst proudnici. Uživatel může snadno přecházet mezi jednotlivými proudnicemi a metoda se tak dá přirovnat k vizualizaci proudnic s řízeným umístěním semínka. Nevýhodou této metody je, že přechod mezi proudnicemi je příliš snadný a uživatel o něm nemá příliš dobrou zpětnou vazbu. Díky své přímočarosti a jednoduchosti je však tato metoda i dnes hojně využívána [LAC08, YBTS08, MAPB09].

Jednou z možností, jak dát uživateli vědět, že přechází mezi jednotlivými proudnicemi, je vhodné užití síly. Metoda příčného tlumení [PL98] využívá efektu viskozity při pohybu haptického bodu ve směru kolmém na proudnici. Podobně jako u předchozí metody, pokud uživatel neklade žádný odpor, sleduje haptický bod proudnici. Pokud však chce přejít mezi proudnicemi, musí překonat viskozitu.

4.2.3 Řízení lokálními vlastnostmi

Při prozkoumávání vektorových dat je častou úlohou hledání významných lokálních rysů v datech (rázy, víry...).

Vizualizace víření v třírozměrných datech je poměrně komplikovaná a ne příliš intuitivní. Zapojením haptického zařízení se šesti stupni volnosti umožňuje přirozené mapování vířivých sil, pomocí aplikace torzní síly na zařízení. Velikost síly je řízena vzdáleností od středu víření [PL98].

Pro zobrazování vířivosti na haptických zařízeních se třemi stupni volnosti byla navržena jednoduchá metoda, která pro výpočet síly používá operátor rotace [IBL+99]. Síla tak působí směrem do středu víru:

$$F_{fb} = \tau(\nabla \times \vec{V}(\vec{x}_{probe})) \times \vec{V}(\vec{x}_{probe}) \quad (14)$$

4.3 Haptická primitiva

Pro sjednocení přístupů a jednodušší návrh silového působení byla navržena sada haptických primitiv, jejichž superpozicí by mělo být možné vymodelovat většinu haptických odezev [LGY05]. Navržená primitiva působí svými silovými účinky na virtuální haptický bod. Každé z primitiv lze charakterizovat pozicí \vec{x} , silou s a v případě orientovaných primitiv jednotkovým vektorem \hat{q} .

Nejjednodušším primitivem je orientovaná síla, která je nezávislá na pozici haptického bodu a je určena pouze parametrem síly a směrem (v dalším textu bude označována pomocí symbolu $\ominus_{\hat{q}}^s$):

$$F_p(\vec{x}_{proxy}) = \ominus_{\hat{q}}^s = s\hat{q} \quad (15)$$

Bodové primitivum funguje jako všesměrový atraktor - není tedy závislé na směru. Síla, která působí na haptický bod je závislá na vzdálenosti haptického bodu od primitiva (značeno symbolem $\odot_{\vec{x}}^s$):

$$F_p(\vec{x}_{proxy}) = \odot_{\vec{x}}^s = \begin{cases} 0, & \text{jestliže } |\vec{x} - \vec{x}_{proxy}| = 0, \\ s \frac{\vec{x} - \vec{x}_{proxy}}{|\vec{x} - \vec{x}_{proxy}|} & \text{jinak.} \end{cases} \quad (16)$$

Přímkové primitivum přitahuje haptický bod k nejbližšímu bodu přímky, určené bodem \vec{x} a vektorem \hat{q} (značeno symbolem $\oslash_{\hat{q}, \vec{x}}^s$). Je tedy nutné spočítat směr od virtuálního bodu k nejbližšímu bodu na přímce $\vec{m} = \hat{q}[\hat{q} \cdot (\vec{x} - \vec{x}_{proxy})] - (\vec{x} - \vec{x}_{proxy})$.

$$F_p(\vec{x}_{proxy}) = \oslash_{\hat{q}, \vec{x}}^s = \begin{cases} 0, & \text{jestliže } |\vec{m}| = 0, \\ s \frac{\vec{m}}{|\vec{m}|} & \text{jinak.} \end{cases} \quad (17)$$

Rovinné primitivum (značené $\oplus_{\hat{q}, \vec{x}_{proxy}}^s$) funguje obdobně jako orientovaná síla, s tím rozdílem, že působí pouze v případě, že se haptický bod nachází v záporném poloprostoru definovaném rovinou procházející bodem \vec{x} s normálou \hat{q} :

$$F_p(\vec{x}_{proxy}) = \mathbb{P}_{\hat{q}, \vec{x}}^s = \begin{cases} 0, & \text{jestliže } (\vec{x}_{proxy} - \vec{x}) \cdot \hat{q} \geq 0, \\ s\hat{q} & \text{jinak.} \end{cases}$$

Nová pozice virtuálního haptického bodu se v každém kroku vypočítá vyrovnáním sil jednotlivých primitiv a přitažlivé síly k reálnému haptickému bodu, přesněji řečeno numerickou minimalizací zbytku ϵ :

$$\epsilon = -F_{fb} + \sum_i F_{p_i}(\vec{x}_{proxy})$$

4.3.1 Skládání primitiv

Pomocí navržených primitiv lze vhodnou kombinací simulovat mnoho haptických efektů na poměrně abstraktní úrovni. To umožňuje jednotný návrh i poměrně složitých interakcí. Jednotlivé haptické režimy lze snadno vytvářet i pomocí uživatelsky přívětivého rozhraní, protože jediné, co je potřeba, je vybrat patřičná primitiva a nastavit jejich parametry. Ve většině případů stačí umístit primitivum na předchozí pozici virtuálního haptického bodu. Následuje ukázka abstraktního popisu několika efektů, které byly popsány v předchozích kapitolách.

Primitivum orientované síly lze využít např. pro přímé mapování gradientu, kdy síla je dána mapovací funkcí $\tau()$ a směr je určen gradientem v bodě:

$$\epsilon = -F_{fb} + \mathbb{P}_{\hat{q}}^s \quad (18)$$

$$s = \tau(V(\vec{x}_{probe})) \quad (19)$$

$$\hat{q} = \nabla V(\vec{x}_{probe}) \quad (20)$$

Bodové primitivum lze využít například k modelování viskozity v bodě. Zde je potřeba znát i pozici virtuálního haptického bodu v minulém snímku \vec{x}'_{probe} , kam je také primitivum umístěno:

$$\epsilon = -F_{fb} + \mathbb{P}_{\vec{x}}^s \quad (21)$$

$$s = \tau(V(\vec{x}'_{probe}))(\vec{x}_{probe} - \vec{x}'_{probe}) \quad (22)$$

$$\vec{x} = \vec{x}'_{probe} \quad (23)$$

Podobně jednoduchým způsobem lze pomocí přímkového primitiva vyjádřit sílu,

která je řízena směrem vektoru ve vektorovém poli:

$$\epsilon = -F_{fb} + \mathcal{O}_{\vec{x}, \hat{q}}^s \quad (24)$$

$$s = \tau(|\vec{V}(\vec{x})|) \quad (25)$$

$$\vec{x} = \vec{x}_{probe} \quad (26)$$

$$\hat{q} = \frac{\vec{V}(\vec{x})}{|\vec{V}(\vec{x})|} \quad (27)$$

Skládáním primitiv pak lze dosáhnout i složitějších konstrukcí pro výpočet síly. Například metoda naznačená v kapitole 4.1.3 lze zjednodušeně nahradit použitím primitiva přímkového, které se bude starat o simulaci tření a rovinného primitiva pro simulaci prostupnosti povrchu:

$$\epsilon = -F_{fb} + \mathcal{O}_{\vec{x}, \hat{q}}^{sl} + \mathbb{D}_{\vec{x}, \hat{q}}^{sp} \quad (28)$$

$$s_l = \tau_l(V(\vec{x})) \quad (29)$$

$$s_p = \tau_p(V(\vec{x}))k\hat{q}(\vec{x} - \vec{x}'_{probe}) \quad (30)$$

$$\vec{x} = \vec{x}_{probe} \quad (31)$$

$$\hat{q} = \frac{\nabla V(\vec{x})}{|\nabla V(\vec{x})|} \quad (32)$$

Díky své univerzálnosti je výše uvedený způsob výpočtu haptické síly implementován ve volně dostupné knihovně H3D (<http://www.h3d.org>).

5 Závěr

Vývoj v oblasti haptického zobrazování jde dopředu jen velmi pomalu, což dokazuje fakt, že většina zařízení je na trhu bez větších změn už řadu let (zařízení Phantom pochází z roku 1994). Na druhou stranu, v posledních několika letech přichází oživení, a to jak na trhu s profesionálním zařízením (např. Sigma.7 – novinka firmy ForceDimension z roku 2010, rozšíření zařízení Phantom 6DOF o další stupeň volnosti z roku 2007), tak na trhu s nízkonákladovým zařízením (Falcon Novint z roku 2007).

V oblasti knihoven pro haptickou vizualizaci je situace radostnější. Jednotlivé společnosti neustále vyvíjí svoje proprietární řešení, např. SensAble OpenHaptics v.3 z roku 2009 přináší podporu 64bitových systémů Windows, podporu OS Linux či zcela nové micro API QuickHaptics. Poslední stabilní verze knihovny Chai3D pochází z listopadu 2009 (poslední změny kódu jsou z listopadu 2010) a aktuální verze knihovny H3D z června 2010.

Přestože se problematika haptické vizualizace objemových dat začala řešit už před téměř dvaceti lety, stále se jedná o aktuální téma, což dokazují publikace z posledních let ([LAC08, YBTS08, MAPB09]). Stále zde existuje mnoho oblastí, které nejsou uspokojivě řešeny. Jednou z nich je vizualizace časově proměnných objemových dat [LPCY08], druhou oblastí je LOD či jiné metody pro dynamickou redukci objemových dat se zaměřením na haptickou vizualizaci.

zařízení výrobce	cena [tis. Kč] DOF A/P	síla [N] torze [mNm]	prac.prost. [cm]
Falcon Novint	4 3/3	8,5 -	∅10x12
Omega.3 Force Dimension	300 3/3	12 -	∅16x11
Delta.3 Force Dimension	500 3/3	20 -	∅40x26
HapticMaster MOOG	580 3/3	250 -	64x40x36
Phantom Omni Sensable	40 3/6	3,3 -	16x12x7
Phantom Desktop Sensable	220 3/6	7,9 -	16x12x12
Phantom Premium 1.0 Sensable	340 3/6	8,5 -	25x17x12
Omega.6 Force Dimension	- 3/6	12 -	∅16x11
Phantom Premium 1.5 Sensable	1000 3/6	8,5 -	38x27x19
Phantom Premium 1.5 HF Sensable	- 3/6	37,5 -	38x27x19
Omega.7 Force Dimension	- 4/7	12 -	∅16x11
Virtuose 6D Desktop Haption	720 6/6	10 500	∅12
Delta.6 Force Dimension	900 6/6	20 150	∅40x26
Phantom Premium 3.0 6DOF Sensable	- 6/6	22 515	84x58x40
Phantom Premium 1.5 HF 6DOF Sensable	- 6/6	37,5 515	38x27x19
Phantom Premium 1.5 6DOF Sensable	- 6/6	8,5 515	38x27x19
Sigma.7 Force Dimension	- 7/7	20 400	∅19x13

Tabulka 1: Porovnání haptických zařízení. Uvedené ceny jsou pouze orientační, u většiny zařízení je cena pouze na vyžádání. Tabulka je primárně řazena podle stupňů volnosti (DOF), v případě shody pak podle ceny. Vzhledem k rozdílným konstrukcím zařízení jsou velikosti pracovních prostorů definovány buď jako kvádr (ŠxVxH), válce (∅xHloubka) či koule (∅).

A Přílohy

A.1 Zařízení Phantom Omni

V současné době jediné haptické zařízení v laboratořích CGV je Sensable Phantom Omni, které bylo zakoupeno v březnu 2009. Od té doby vzniklo pro toto zařízení několik aplikací a závěrečných prací, mimo jiné i wrapper knihovny OpenHaptics pro platformu .NET [BOH10].

V konstrukci zařízení je několik problematických míst, která mohou působit a působí problémy. Tyto problémy se týkají převodu sil na jednotlivá ramena pomocí vodících lanek, která mohou snadno vypadnout z vodících drážek. Závada se snadno detekuje tak, že na některé rameno nepůsobí žádná síla, je však slyšet zvuk servomotoru a při sledování stavu zařízení pomocí programového vybavení (např. kalibrační utilita) se rameno pohybuje.

Vzhledem k tomu, že záruční doba byla pouze jednoletá a pozáruční opravy pro toto zařízení firma Sensable neposkytuje (možnost zničení zařízení pomocí programového nástroje a na základě protokolu možnost získání slevy na nové zařízení), je nejjednodušší opravit zařízení přímo na místě. Dobrým vodítkem pro rozebrání zařízení jsou stránky Repairing Phantom Omni na univerzitě Johns Hopkins [JHU10].

Jednotlivé kroky, které je nutné učinit:

1. Povolit 8 šroubů na spodní straně fantoma.
2. Povolit šrouby, které drží obě poloviny pláště podstavy. Pozor, není dobré se pokoušet oddělit hlavu od podstavy fantoma, dojde pravděpodobně k odmotání vodícího lanka, které otáčí hlavou a následné nasazení a sestavení zařízení je mnohem pracnější a personálně náročnější (lépe ve dvou lidech).
3. Sejmout krytky na bocích hlavy fantoma.
4. Povolit šrouby na levé! straně hlavy a odejmout levou část.
5. Nyní je možné povolit i pravou část, která je přichycena zevnitř.
6. Pokud je viditelně odmotané některé vodící lanko, nasadit jej a zařízení opět složit. V opačném případě je pravděpodobně spadlé vodící lanko uvnitř ramene
7. Kryt ramene lze rozebrat povolením šroubu, který se nachází na spodní části ramene u hlavy.
8. Pokud ani tady není zjevná závada, pak je nutné experimentálně opravit a doplnit tuto zprávu o další postup.

Reference

- [AS96] R. S. Avila, and L. M. Sobierajski. *A haptic interaction method for volume visualization*. In Proceedings of the 7th conference on Visualization '96 (VIS '96), pp. 197, 1996.
- [BRO11] I. Brouwer. *Haptic Interfaces*. 2010. URL [http:// www.bracina.com/haptichardware.html](http://www.bracina.com/haptichardware.html).
- [BOH10] A. Boháč. *.NET Wrapper pro knihovnu k zařízení Phantom*. Plzeň. 2010. Bakalářská práce. ZČU.
- [CHS00] K. W. Chen, P. A. Heng, and H. Sun. *Direct haptic rendering of isosurface by intermediate representation*. In Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology VRST '00, pp. 188–194, 2000.
- [DMW+98] L. J. K. Durbeck, N. J. Macias, D. M. Weinstein, C. R. Johnson, and J. M. Hollerbach. *SCIRun Haptic Display for Scientific Visualization*. In Third Phantom User's Group Workshop, pp. 65-69, 1998.
- [IBHJ03] M. Ikits, J. D. Brederson, C. D. Hansen, and C. R. Johnson. *A constraint-based technique for haptic volume exploration*. In Proceedings of IEEE Visualization '03, pp. 263–269, 2003.
- [IBL+99] F. Infed, S. V. Brown, C. D. Lee, D. A. Lawrence, A. M. Dougherty, L. Y. Pao. *Combined visual/haptic rendering modes for scientific visualization*. In Proceedings of 8th annual symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, 1999.
- [IN93] H. Iwata, H. Noma. *Volume haptization*. In Virtual Reality, pp.16-23, 1993.
- [JHU10] Johns Hopkins University - Haptics Laboratory. *Repairing a PHANTOM Omni*. URL [http:// haptics.lcsr.jhu.edu/ Repairing_a_PHANTOM_Omni](http://haptics.lcsr.jhu.edu/Repairing_a_PHANTOM_Omni) [cited 12.2010]
- [KSW+99] O. Körner, M. Schill, C. Wagner, H.-J. Bender, and R. Männer. *Haptic volume rendering with an intermediate local representation*. In Proceedings of the 1st International Workshop on the Haptic Devices in Medical Applications, pp. 79–84, 1999.
- [LAC08] C. Lee, B. D. Adelstein, and S. Choi. *Haptic Weather*, In Proceedings of symposium on Haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems haptics 2008, pp. 473–474, 2008.
- [LC87] W. E. Lorensen, H. E. Cline. *Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm*. In Computer Graphics, Vol. 21, Nr. 4, 1987.

- [LGY05] K. Lundin, B. Gudmundsson, and A. Ynnerman. *General proxybased haptics for volume visualization*. In Proceedings of the world haptics conference, pp. 557–560, 2005.
- [LLFR02] R.Q. Van Der Linde, P. Lammertse, E. Frederiksen, and B. Ruiter. *The HapticMaster, a new high-performance haptic interface*, 2002.
- [LLPN00] D. A. Lawrence, C. D. Lee, L. Y. Pao, and R. Y. Novoselov. *Shock and vortex visualization using a combined visual/ haptic interface*. In Proceedings of Visualization 2000, pp. 131–137, 2000.
- [LPCY08] K. Lundin Palmerius, M. Cooper, and A. Ynnerman. *Haptic Rendering of Dynamic Volumetric Data*. In IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, pp. 263-276, 2008.
- [LYG02] K. Lundin, A. Ynnerman and B. Gudmundsson. *Proxy-based Haptic Feedback from Volumetric Density Data*. In Eurohaptics 2002, pp. 104-109, 2002.
- [MAPB09] B. Menelas, M. Ammi, L. Pastur, and P. Bourdot. *Haptical exploration of an unsteady flow*. In Proceedings and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems EuroHaptics conference World Haptics 2009, pp. 232–237, 2009.
- [MH09] S. Martin, and N. Hiller. *Characterisation of the Novint Falcon Haptic Device for Application as a Robot Manipulator*. In Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), 2009.
- [PL98] L. Y. Pao and D. A. Lawrence. *Synergistic Visual/Haptic Computer Interfaces*. In Proc. of Japan/USA/Vietnam Workshop on Research and Education in Systems, Computation, and Control Engineering, pp. 155-162, 1998.
- [RBKB03] T. van Reimersdahl, F. Bley, T. Kuhlen, and C. H. Bischof. *Haptic rendering techniques for the interactive exploration of CFD datasets in virtual environments*. In Proceedings of the workshop on Virtual environments 2003 (EGVE '03), pp. 241-246, 2003.
- [RKK97] D. C. Ruspini, K. Kolarov, and O. Khatib. *The haptic display of complex graphical environments*. In Computer Graphics, 31 (Annual Conference Series), pp. 345–352, 1997.
- [SENS08] SensAble. *OpenHaptics Toolkit Programmer's Guide*. 2008. URL [http:// www.sensable.com/ documents/ documents/ OpenHaptics_ProgGuide.pdf](http://www.sensable.com/documents/documents/OpenHaptics_ProgGuide.pdf)

- [YBTS08] N. Yannier, C. Basdogan, S. Tasiran, and O. L. Sen. *Using Haptics to Convey Cause-and-Effect Relations in Climate Visualization*. IEEE Transactions on Haptics 1 (2008), no. 2, pp. 130–141, 2008.
- [ZS95] C. B. Zilles, J. K. Salisbury. *A constraint-based god-object method for haptic display*. In IROS '95 Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 3, 1995.