

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

# HAPTIČNI ROBOTI

JANUAR, 2007

*“Realnost je zgolj iluzija, vendar zelo obstojna.”*

*(“Reality is merely an illusion, albeit a very persistent one.”)*

*Albert Einstein (1879-1955)*

## Predgovor

Leta 1965 je imel profesor I. Sutherland na kongresu v New Yorku predavanje z naslovom *The Ultimate Display*. Poslušalce je navdušil z idejo v kateri računalniški zaslon predstavlja okno skozi katerega človek gleda v navidezni svet, pozornost pa vzbudil z idejo o posredovanju tipne povratne informacije človeku, ki interaktivno deluje v navideznem okolju. V šestdesetih letih prejšnjega stoletja računalniki še niso bili dovolj zmogljivi za uresničitev njegove vizije. Danes, dobrih trideset let pozneje, pa navidezna resničnost vstopa v vsakdanjo uporabo. Razvoj računalnikov je postopoma omogočil izvedbo vizualne, zvočne in haptične upodobitve navideznega sveta. Z razširitvijo domene upodabljanja na haptično prikazovanje, ki podaja povratno informacijo o velikosti in prostorski porazdelitvi sile ob dotiku objektov navideznega sveta, se je izboljšala kvaliteta interakcije med človekom in strojem. Haptična interakcija je postala del aplikacij, kot so manipulacija nanomaterialov, predpriprava in izvedba kirurških operacij, rehabilitacija oseb s prizadetim senzorno-motoričnim sistemom, izdelovanje virtualnih prototipov v industriji, digitalno kiparstvo, igre in zabava.

Knjiga *Haptični roboti* je nastala na podlagi zapiskov za predavanja o haptičnih sistemih študentom robotike. Obravnava problematiko haptične interakcije v navideznih okoljih in teleoperacijskih sistemih in s tem pokriva področje sodobnih raziskav o navideznem dotiku, enem od osnovnih elementov navidezne resničnosti. Knjiga je razdeljena na deset poglavij. Vsako poglavje zase predstavlja zaokroženo celoto, kar bralcu omogoča, da se neposredno posveti iskani problematiki. Deset poglavij skupaj pa podaja celovit pregled tematike haptične interakcije. Knjiga seveda ne pokriva vse teorije in prakse s področja haptičnih robotov, poskuša pa opozoriti na najpomembnejše vidike haptične interakcije in usmerja bralca k rešitvi osnovnih problemov. Kritičen bralec pa bo rešitve prikazane v knjigi znal nadgraditi s specifičnim pristopom za konkretno nalogo.

Poglavje *Uvod v navidezno resničnost* definira medij navidezne resničnosti, predstavi osnove upodabljanja navideznega sveta v vizualni, zvočni in hap-

tični obliki ter oblike interakcije z navideznim svetom. S ciljem predstaviti navidezno resničnost čim širšemu krogu bralcev je poglavje napisano v poljudnoznanstveni obliki. V izogib vključitvi zahtevnejše tematike v uvodno poglavje je posebej podan *Uvod v haptičnost*, ki bralca uvede v strokovno izrazoslovje s področja haptične interakcije.

Haptična interakcija temelji na vzajemnem delovanju med robotsko napravo in človekom. Učinkovita in stabilna interakcija je pogojena s pravilnim razumevanjem lastnosti človekovega senzorno-motoričnega sistema. Človekov motorični sistem omogoča upravljanje haptične naprave, ki v nasprotni smeri posreduje človeku tipno informacijo v obliki sile. Poglavje z naslovom *Človekov haptični sistem* podaja zahteve za haptične naprave z vidika človekovega senzorno-motoričnega sistema. Poglavje *Haptični vmesniki* analizira osnovne kinematične in dinamične lastnosti kinestetičnih in taktilnih haptičnih naprav. Ker tehnologija izvedbe naprav relativno hitro zastara, teoretične osnove pa običajno ostajajo nespremenjene, so haptične naprave predstavljene le z nekaj karakterističnimi primeri, ki prikazujejo različne kinematične strukture mehanizmov.

V poglavju *Haptično zaznavanje dotika* so predstavljene osnove zaznavanja dotika med objekti v navideznem okolju. Za ustrezno predstavitev reakcijske sile, ki preko haptičnega vmesnika deluje na človeka, je potrebno zaznati dotike med objekti navideznega sveta in točko interakcije s človekom. Detekcija dotika med objekti je odvisna od načina modeliranja geometrijskih lastnosti objektov. Večina metod geometrijskega modeliranja izhaja iz področja računalniške grafike, pri čemer je najpogostejša uporaba poligonskih modelov. Za ohranitev konsistentnosti med grafičnim in haptičnim upodabljanjem navideznega sveta je zaznavanje dotika predstavljeno na primeru poligonske predstavitve. V trenutku dotika med objekti se na osnovi fizikalnega modela navideznega okolja izračunajo sile interakcije, ki preko haptičnega robota delujejo na človeka. V poglavju *Haptično prikazovanje dotika* so predstavljeni fizikalni modeli, ki omogočajo uporabniku sistema navidezne resničnosti dotikanje, zaznavanje in manipulacijo navideznih objektov v simuliranem okolju preko haptičnega vmesnika. Obravnavane so bistvene lastnosti navideznih objektov, ki jih je potrebno modelirati, kot so prazen prostor, togost, trenje in dinamika gibanja objektov.

Haptični robot je v osnovi običajen robot z mehanizmom, pogoni in regulatorjem. Zanj je potrebno načrtati ustrezno vodenje, ki pa je specifično v smislu interakcije s človekom. V poglavju *Vodenje haptičnih vmesnikov* so vpeljane osnovne regulacijske sheme za impedančno in admitančno vodenje haptičnih vmesnikov in prikazani vplivi interakcije robota s človekom na regulacijsko zanko. Predstavitev vodenja haptičnih vmesnikov je osredotočena na osnovne metode, saj kompleksnejše izvedbe, ki jih je mogoče najti v literaturi običajno temeljijo na eni od predstavljenih metod. Del načrtovanja

vodenja je tudi analiza stabilnosti regulacijskega sistema, ki je zaradi specifičnosti haptičnih vmesnikov, ki delujejo v tesni povezavi s človekom, še posebnega pomena. Stabilnost je predpogoj za varno delovanje. V poglavju *Stabilnost haptičnih vmesnikov* so analizirani vzroki nestabilnega delovanja in predstavljene osnovne metode za zagotavljanje stabilnosti. Analiza stabilnosti je izvedena z uporabo četveropolnih modelov, ki izhajajo iz teorije električnih vezij in omogočajo obravnavo sistemov, kjer električne in mehanske veličine nastopajo istočasno.

Haptični roboti, kot so predstavljeni v prvih osmih poglavjih, so predvsem namenjeni interakciji z navideznimi svetovi. V nekaterih nalogah pa se pojavi potreba po posredni interakciji z oddaljenim realnim svetom preko teleoperacijskega sistema zgrajenega iz dveh robotov, ki predstavljata upravljalno in izvršno napravo, in komunikacijskega kanala, ki usklajuje delovanje obeh naprav. Upravljalna naprava je običajno haptični robot, ki sprejema ukaze v obliki gibanja od operaterja in nazaj operaterju posreduje tipne informacije o interakciji med izvršnim robotom in okoljem. V poglavju *Teleoperacija* je iz vidika vodenja analizirana uporaba haptičnega robota kot podsistema teleoperacijskega sistema. Ena od pomembnih lastnosti teleoperacijskega sistema je možnost skaliranja sil in premikov med upravljalno in izvršno napravo. Na ta način je mogoče gibanje roke operaterja, ki se meri v metrih, preslikati v premik izvršnega robota, ki se meri v nanometrih in sile, ki nastopajo na molekularnem nivoju preslikati v sile, ki jih more zaznati človek. Uporaba haptičnih robotov na področju nanotehnologij je predstavljena v zadnjem poglavju z naslovom *Mikro/nanomanipulacija*. Haptična naprava je uporabljena za upravljanje izvršnega sistema, ki omogoča manipulacijo posameznih atomov in molekul in s tem gradnjo nanostruktur s posebnimi lastnostmi.

# Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod v navidezno resničnost</b>	<b>1</b>
1.1	Definicija navidezne resničnosti . . . . .	1
1.1.1	Navidezno okolje . . . . .	1
1.1.2	Navidezna prisotnost . . . . .	2
1.1.3	Senzorna povratna informacija . . . . .	2
1.1.4	Interaktivnost . . . . .	2
1.2	Pojmi povezani z navidezno resničnostjo . . . . .	3
1.2.1	Umetna resničnost . . . . .	3
1.2.2	Kibernetski prostor . . . . .	3
1.2.3	Obogatena resničnost . . . . .	3
1.2.4	Teleprisotnost . . . . .	3
1.3	Navidezna resničnost: medij . . . . .	4
1.4	Sistemi navidezne resničnosti . . . . .	5
1.5	Vmesnik do navideznega sveta: vhod . . . . .	5
1.5.1	Zaznavanje gibanja uporabnika . . . . .	7
1.5.2	Zaznavanje okolice . . . . .	10
1.6	Vmesnik do navideznega sveta: izhod . . . . .	11
1.6.1	Vizualni prikazovalniki . . . . .	11
1.6.2	Zvokovni prikazovalniki . . . . .	18
1.6.3	Haptični prikazovalniki . . . . .	21
1.6.4	Vestibularni prikazovalniki . . . . .	24
1.7	Upodobitev navideznega sveta . . . . .	24
1.7.1	Predstavitev navideznega sveta . . . . .	24
1.7.2	Vizualna predstavitev v navidezni resničnosti . . . . .	25
1.7.3	Zvočna predstavitev v navidezni resničnosti . . . . .	26
1.7.4	Haptična predstavitev v navidezni resničnosti . . . . .	27
1.7.5	Metode upodabljanja navideznega sveta . . . . .	28
1.8	Interakcija z navideznim svetom . . . . .	34
1.8.1	Manipulacija v navideznem svetu . . . . .	35
1.8.2	Navigacija v navideznem svetu . . . . .	37
1.8.3	Interakcija z ostalimi uporabniki . . . . .	38

1.9	Izkustvo navidezne resničnosti . . . . .	40
1.9.1	Navidezna prisotnost . . . . .	40
1.9.2	Fizikalni zakoni delovanja navideznega sveta . . . . .	42
1.9.3	Vsebina navideznega sveta . . . . .	42
<b>2</b>	<b>Uvod v haptičnost</b>	<b>45</b>
2.1	Definicija haptičnosti . . . . .	45
2.2	Potreba po haptičnosti . . . . .	47
2.3	Terminologija . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Človekov haptični sistem</b>	<b>51</b>
3.1	Receptorji . . . . .	54
3.2	Kinestetični čuti . . . . .	55
3.2.1	Čutila . . . . .	55
3.2.2	Zaznavanje gibanja in položaja okončin . . . . .	58
3.2.3	Zaznavanje sile . . . . .	59
3.2.4	Zaznavanje togosti, viskoznosti in vztrajnosti . . . . .	59
3.3	Taktilni čuti . . . . .	59
3.4	Človekov motorični sistem . . . . .	61
3.4.1	Dinamične lastnosti človeške roke . . . . .	62
3.4.2	Dinamika mišične aktivacije . . . . .	63
3.4.3	Dinamika mišičnega krčenja in pasivnega tkiva . . . . .	63
3.4.4	Nevronska povratna zanka . . . . .	64
3.5	Posebne lastnosti človekovega haptičnega sistema . . . . .	65
3.5.1	Distalni do proksimalni gradient haptične natančnosti . . . . .	65
3.5.2	Zaznavni pomen spremembe . . . . .	65
3.5.3	Dvoročni referenčni koordinatni sistem . . . . .	66
3.5.4	Dejavniki, ki določajo hitrost prenosa informacij . . . . .	66
<b>4</b>	<b>Haptični vmesniki</b>	<b>67</b>
4.1	Kinestetični haptični vmesniki . . . . .	67
4.1.1	Kriteriji načrtovanja in izbire haptičnih vmesnikov . . . . .	67
4.1.2	Klasifikacija haptičnih vmesnikov . . . . .	70
4.1.3	Neprenosni haptični vmesniki . . . . .	71
4.1.4	Prenosni haptični vmesniki . . . . .	79
4.2	Taktilni haptični vmesniki . . . . .	82
<b>5</b>	<b>Haptično zaznavanje dotika</b>	<b>85</b>
5.1	Merjenje dotika v telemanipulacijskem okolju . . . . .	85
5.1.1	Senzorji sil in momentov . . . . .	86
5.1.2	Taktilni senzorji . . . . .	86
5.2	Zaznavanje dotika v navideznem okolju . . . . .	87
5.2.1	Predstavitev modelov navideznih objektov . . . . .	88

---

5.2.2	Zaznavanje dotika v poligonskih modelih . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Haptično prikazovanje dotika</b>	<b>101</b>
6.1	Modeliranje praznega prostora . . . . .	105
6.2	Modeliranje togosti objektov . . . . .	105
6.2.1	Model vzmet-usmerjeni dušilnik . . . . .	106
6.2.2	Model zavornega pulza . . . . .	106
6.2.3	Model zaznane togosti . . . . .	108
6.3	Modeliranje trenja . . . . .	109
6.4	Dinamika navideznih okolij . . . . .	110
<b>7</b>	<b>Vodenje haptičnih vmesnikov</b>	<b>115</b>
7.1	Odprtozančno impedančno vodenje . . . . .	119
7.2	Zaprtozančno impedančno vodenje . . . . .	122
7.3	Zaprtozančno admitančno vodenje . . . . .	124
<b>8</b>	<b>Stabilnost haptičnih vmesnikov</b>	<b>129</b>
8.1	Aktivno vedenje navidezne vzmeti . . . . .	129
8.2	Dvopolni in četveropolni model haptične interakcije . . . . .	131
8.2.1	Dvopolni model haptične interakcije . . . . .	131
8.2.2	Četveropolni model haptične interakcije . . . . .	132
8.3	Stabilnost in pasivnost haptične interakcije . . . . .	134
8.4	Transparentnost in dosegljivo območje impedanc . . . . .	136
8.4.1	Dejavniki, ki vplivajo na $Z$ -širino . . . . .	137
8.5	Navidezna sklopitev . . . . .	140
8.5.1	Impedančni prikazovalnik . . . . .	141
8.5.2	Admitančni prikazovalnik . . . . .	146
8.5.3	Dualnost . . . . .	151
8.6	Pasivnost haptičnega vmesnika . . . . .	153
8.6.1	Observator pasivnosti . . . . .	154
8.6.2	Regulator pasivnosti . . . . .	156
<b>9</b>	<b>Teleoperacija</b>	<b>161</b>
9.1	Primerjava teleoperacije in navidezne resničnosti . . . . .	162
9.2	Fizikalno ozadje teleoperacije . . . . .	163
9.3	Četveropolni model teleoperacije . . . . .	163
9.4	Teleoperacijski sistemi . . . . .	166
9.5	Štirikanalna arhitektura vodenja . . . . .	170
9.6	Dvokanalne arhitekture vodenja . . . . .	172
9.6.1	Dvokanalna arhitektura vodenja položaj-položaj . . . . .	173
9.6.2	Dvokanalna regulacijska arhitektura sila-položaj . . . . .	176
9.6.3	Primerjava različnih dvokanalnih arhitektur vodenja . . . . .	178
9.7	Pasivnost teleoperacijskega sistema . . . . .	179



---

<b>10 Mikro/nanomanipulacija</b>	<b>187</b>
10.1 Fizika v svetu nanometrskih dimenzij . . . . .	187
10.1.1 Zvezni model nanometrskih sil . . . . .	190
10.2 Sistem za nanomanipulacijo . . . . .	192
10.2.1 Nanomanipulator . . . . .	192
10.2.2 Pogoni . . . . .	193
10.2.3 Merjenje sil interakcije . . . . .	193
10.2.4 Model dinamike dotika . . . . .	194
10.3 Vodenje skalirane dvostranske teleoperacije . . . . .	196
10.3.1 Modela dinamike haptičnega prikazovalnika in nano- manipulatorja . . . . .	197
10.3.2 Načrtovanje vodenja . . . . .	198
10.4 Uporaba nanomanipulacije . . . . .	198
<b>Literatura</b>	<b>206</b>

# 1

## Uvod v navidezno resničnost

### 1.1 Definicija navidezne resničnosti

Človeška zgodovina je zaznamovana z razvojem medijev, ki omogočajo izmenjavo idej. Zadnji korak v tem razvoju predstavlja uporaba *navidezne resničnosti*. Navidezno resničnost definiramo kot medij sestavljen iz interaktivne računalniške simulacije, ki zaznava uporabnikov položaj in delovanje ter nadomesti ali obogati povratno senzorno informacijo enemu ali več čutom, s čimer dobimo občutek navidezne prisotnosti v simulaciji (navideznem okolju). Tako lahko v navidezni resničnosti identificiramo štiri osnovne elemente: navidezno okolje, navidezna prisotnost, senzorna povratna informacija (kot odziv na uporabnikovo delovanje) in interaktivnost.

#### 1.1.1 Navidezno okolje

Navidezno okolje predstavlja vsebino določenega medija, ki lahko bodisi obstaja le v mislih ustvarjalca ali pa je deljena z ostalimi ljudmi. Obstaja lahko ne da bi bilo prikazano preko sistema navidezne resničnosti – podobno kot lahko scenarij za film obstaja neodvisno od samega filma. Računalniško osnovano navidezno okolje tako predstavlja opise objektov znotraj simulacije. Navidezno okolje je torej 1) imaginarni prostor običajno prikazan preko medija in 2) opis množice objektov v prostoru ter pravil in razmerij, ki vodijo te objekte [52]. Ko opazujemo to okolje preko sistema, ki prikaže objekte in omogoča interakcije, kar rezultira v navidezni prisotnosti, govorimo o navidezni resničnosti.

### 1.1.2 Navidezna prisotnost

Navidezno prisotnost lahko v grobem razdelimo na fizično (senzorno) in mentalno. Navidezna prisotnost predstavlja občutek navzočnosti v nekem okolju; lahko je povsem duševno stanje ali pa doseženo preko nekega fizičnega medija: fizična navidezna prisotnost je osnovna značilnost navidezne resničnosti; mentalna navidezna prisotnost uporabnika je običajno cilj ustvarjalca medija. Mentalna navidezna prisotnost predstavlja stanje zamaknjenosti: napetost, pričakovanje ali dvom; vključenost v navidezno okolje. Fizična navidezna prisotnost predstavlja telesno vstopanje v medij; sintetični dražljaji, ki stimulirajo človekova čutila, so ustvarjeni s tehničnimi pripomočki; to pa ne pomeni, da morajo biti vključeni vsi čuti oziroma mora biti zajeto celotno telo. Poleg pojmov fizične (telesne) in mentalne (duševne) navidezne prisotnosti se uporablja še pojem teleprisotnosti.

### 1.1.3 Senzorna povratna informacija

Senzorna povratna informacija je nujna sestavina navidezne resničnosti. Sistem navidezne resničnosti zagotavlja neposredno senzorno povratno informacijo udeležencem glede na njihov fizični položaj. V večini primerov je vid najpomembnejši čut, preko katerega dobivamo povratno informacijo, čeprav obstajajo tudi navidezna okolja, ki prikazujejo le haptično informacijo. Da senzorna povratna informacija ustreza trenutnemu položaju osebe, je potrebno zaznavati njeno gibanje. Zaznavanje lege pomeni računalniško merjenje položaja in orientacije objekta v fizičnem okolju.

### 1.1.4 Interaktivnost

Da postane navidezna resničnost realistična, se mora odzivati na delovanje uporabnika, torej mora biti *interaktivna*. Zmožnost vplivanja na računalniško ustvarjena okolja predstavlja eno od oblik interakcije. Druga možnost je sposobnost spreminjanja zornega kota znotraj okolja. *Večuporabniško okolje* predstavlja razširitev interaktivnega delovanja in označuje večje število uporabnikov, ki interaktivno delujejo znotraj istega navideznega prostora oziroma simulacije. Večuporabniško okolje mora omogočati interakcijo med uporabniki. Takšno okolje seveda ni nujno del navidezne resničnosti.

Ko delujemo v istem okolju z ostalimi ljudmi, je pomembno zaznavati njihovo prisotnost v tem okolju – kje stojijo, kaj počnejo, kam gledajo, kaj govorijo. S pojmom *avatar* (hindujska beseda za utelešenje božanstva) označujemo predstavitev uporabnika v navideznem okolju. Avatar je navidezni objekt, ki predstavlja uporabnika ali fizični objekt znotraj navideznega okolja.