OKOSVÁROS-TECHNOLÓGIÁK VII.

Tartalommegjelenítés és ember–gép interakció

Vajda Ferenc – Jakab László

Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Budapest

SZÉCHENYI 2020

Magyarország Kormánya

Európai Unió
Európai Szociális Alap

BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

OKOSVÁROS-TECHNOLÓGIÁK
A technológia fejlődésének irányai és hatása
VII. kötet

Sorozatszerkesztő:

Sallai Gyula

Vajda Ferenc – Jakab László

TARTALOMMEGJELENÍTÉS ÉS EMBER–GÉP INTERAKCIÓ

Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Közigazgatási Továbbképzési Intézet
Budapest, 2020

A kötet a Nemzeti Közszolgálati Egyetem **KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 „A jó kormányzást megalapozó közszolgálat-fejlesztés”** projektje keretében, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Karán létesült **„Okos város – okos közigazgatás”** utatóműhelyben (2017/162/BME-VIK) készült

Szakmai lektor:
Sallai Gyula, professor emeritus, BME-VIK

A kézirat lezárásának dátuma:
2018. augusztus 31.

© Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Közigazgatási Továbbképzési Intézet, 2020
© Jakab László, 2020
© Vajda Ferenc, 2020

A mű szerzői jogilag védett. Minden jog, így különösen a sokszorosítás, terjesztés és fordítás joga fenntartva. A mű a kiadó írásbeli hozzájárulása nélkül részeiben sem reprodukálható, elektronikus rendszerek felhasználásával nem dolgozható fel, azokban nem tárolható, azokkal nem sokszorosítható és nem terjeszthető.

TARTALOMJEGYZÉK

Bevezetés **7**
1. Ember–gép interakció, az alapoktól **9**
2. Az ember–gép-kapcsolat fejlesztésének szükségessége **16**
2.1 Szövegbevitel 16
2.2 Grafikus felületek 17
2.3 Nagy munkafelületek, sok információ kezelése 18
2.4 Mobil eszközök használata 18
3. Virtuálisvalóság-rendszerek felépítése **20**
4. A virtuális és a kiterjesztett valóság eszközkészlete **23**
4.1 Követőeszközök, manipuláció 23
4.1.1 Követőeszközök paraméterei 23
4.1.2 Optikai követők 25
4.1.3 Elektromágneses követők 26
4.1.4 Inerciális és hibrid követők 27
4.1.5 Mechanikus követők 28
4.1.6 Ultrahangalapú követők 29
4.2 Navigációs megoldások 29
4.2.1 Az objektummanipuláció modellje 30
4.2.2 Navigációra és manipulációra alkalmas eszközök 32
4.2.3 Barangolás a virtuális térben 32
4.3 Gesztusfelismerés 33
4.3.1 Optikai gesztusfelismerés 34
4.3.2 Kesztyűalapú felismerés 35
4.4 Elektromos aktivitás alapú eszközök 36
4.4.1 BCI-interfészek 37
4.4.2 Mioelektromos érzékelők 38
4.5 Képi megjelenítés 39
4.5.1 Az emberi látás 39
4.5.2 Szemüvegalapú megoldások 42
4.5.3 Autosztereoszkóp megjelenítők 45

4.5.4 Fejre szerelhető megjelenítők (HMD) ... 46
4.5.5 Nagy méretű megjelenítők ... 47
4.6 Hangmegjelenítés ... 49
4.6.1 Oldalszög érzékelése ... 50
4.6.2 Magassági szög érzékelése ... 51
4.6.3 Távolság érzékelése ... 51
4.6.4 Virtuális hang előállítása ... 52
4.6.5 Hangszóróalapú megoldások ... 53
4.7 Erő- és tapintásmegjelenítés ... 54
4.7.1 Tapintásvisszacsatolás ... 55
4.7.2 Erő-visszacsatolás ... 56
4.7.3 Haptikus eszközök ... 57
5. Különleges felületek, megoldások ... 59
5.1 Több nézetablakos megoldások ... 59
5.2 Nagyítható felületek ... 59
5.3 3D-s munkafelületek ... 60
5.4 Tapintható felhasználói felületek ... 61
6. Kiterjesztett- és kevertvalóság-rendszerek ... 62
6.1 A kiterjesztett és a kevert valóság ... 62
6.2 A virtuális és a kiterjesztett rendszerek különbségei ... 63
6.3 Optikai kapcsolat a virtuális és a valós tér között ... 64
7. Egészségügyi és társadalmi hatások ... 66
7.1 Módszertan és terminológia ... 66
7.2 Egészségügyi és biztonsági kérdések ... 67
7.2.1 Közvetlen hatások ... 67
7.2.2 Kiberbetegség ... 69
7.2.3 Alkalmazkodás és utóhatások ... 71
7.3 Helyes virtuálisvalóság-használat ... 72
7.4 Társadalmi hatások ... 73
7.4.1 Hátrányok ... 73
7.4.2 Előnyök ... 73
8. Tartalommegjelenítés a közigazgatásban ... 75
8.1 Jelenlegi helyzet ... 75
8.2 Igények, kihívások, alkalmazási lehetőségek ... 77
9. Összefoglalás ... 79
10. Irodalomjegyzék ... 80

BEVEZETÉS

A közigazgatás területén – hasonlóan néhány más területhez – a feldolgozandó adatok mennyisége folyamatosan nő, azok feldolgozása, értelmezése egyre nagyobb nehézséget okoz a közigazgatási alkalmazottaknak. Különösen igaz ez olyan területeken, ahol az adatok közötti összefüggések átlátása, az adatokban való keresés a számítógépek számára leírhatatlan, emberi beavatkozásra van szükség, legyenek azok személyi adatok, közlekedési problémák átlátása vagy akár bűnügyi események összefüggései.

Ilyen jellegű feladatokra jelenleg nagy méretű táblákat, esetleg nagy méretű kétdimenziós kijelzőket alkalmaznak, ugyanakkor az emberi szervezet lehetővé tesz jóval komplexebb érzékelési módokat, a sztereolátás, az audioérzékelés és a tapintásérzékelés széles skálájának segítségével. Amennyiben komolyabb összefüggéseket szeretnénk megismerni, esetleg az adathalmazt manipulálni, célszerű figyelembe venni e lehetőségeket.

Bár már a XX. században elindult egy folyamat, amelynek során egyre több és több információt tárolunk, dolgozunk fel és nyerünk ki a számítógépek segítségével, a XXI. században ez a folyamat tovább erősödik. Ez nem csak a technológiai szakembereket állítja újabb és újabb kihívások elé, hanem az egyedi felhasználókat, cégeket, állami vállalatokat és az egész államigazgatást is. Ennek a problémának számos rétege van az információk megfelelő tárolása, titkosítása mellett, azok érthető megjelenítése, hatékony és biztonságos módosítása végett.

Jelen kismonográfia célja, hogy bemutassa a felhasználó és a számítógép közötti kapcsolat fontosabb problémáit, nehézségeit, bemutassa továbbá a korszerű, sok esetben még kutatási fázisban lévő technikai megoldásokat, illetve azok használatának lehetőségeit a közigazgatásban.

E kismonográfiához közvetlenül kapcsolódik az *Eljárások és módszerek virtuálisvalóság-rendszerekben* című kismonográfia, amelyben az itt leírt problémák és megoldások egy részének algoritmikus és eljárási részletei találhatók meg. Jelen dokumentum nem kíván foglalkozni az implementáció részleteivel, a leírások megértéséhez nincs szükség mély szakértelemre. A szakembereknek szóló információkért a kapcsolódó dokumentumot érdemes tanulmányozni.

A virtuális- és kiterjesztettvalóság-rendszerek területe valójában számos nagy témakört foglal magában. Ezek közül a két talán legnagyobb témakör a számítógépes látás és a számítógépes grafika kérdéseit boncoló szakterületek. E dokumentum e témakörökkel csak érintőlegesen foglalkozik, külön kismonográfiák ismertetik az e területekkel kapcsolatos legfontosabb információkat. A számítógépes látással foglalkozó két fontos kismonográfia:

- *Számítógépes látás a közigazgatásban: alapfeladatok és alkalmazások”*
- *Számítógépes látórendszerek alkalmazása e-közigazgatásban: gyakran használt algoritmusok és megoldások*

A számítógépes grafikával foglalkozó monográfiák az alábbiak:

- *Képmegjelenítés és animáció 3D rendszereken*
- *Korszerű 3D algoritmusok virtuális valóság alkalmazásokhoz*

Ez a hat kismonográfia (beleértve a jelen dokumentumot is) együttesen próbálja meg lefedni e terület közigazgatásban használható technológiai lehetőségeit.

Jelen dokumentum tizenegy fejezetből áll. A *Bevezetés, az Összefoglalás*, és az *Irodalomjegyzék* mellett nyolc fejezet foglalkozik a virtuálisvalóság-rendszerek problémakörével.

Az első fejezet az ember–gép interakció alapjait tekinti át.

A második fejezet részletesen foglalkozik az ember–gép kapcsolat azon problémáival, amelyekre egy megfelelően kialakított, alternatív eszközökre épülő kommunikációs eljárásrendszer megoldást nyújthat. Itt ismertetjük a szöveg- és egyéb információbevitellel kapcsolatos nehézségeket, és azt a kérdéskört, hogy mit okozhat a szokatlanul nagy információáramlás, illetve itt írunk a mobil eszközöknek köszönhető kihívásokról is.

A harmadik fejezetben röviden foglalkozunk a virtuálisvalóság-rendszerek felépítésével, azzal, hogy milyen modelleket alkalmazhatunk, milyen módon kapcsolhatjuk össze az egyes komponenseket modellszinten.

A negyedik fejezet ismerteti a virtuális valóság alkalmazása során használható fontosabb eszközöket. Részletesen írunk a követőeszközök megoldásairól (felhasználó fejének, végtagjainak stb. követése), a különféle adatbeviteli és megjelenítőeszközökről – beleértve a vizuális megjelenítés mellett az audio- és a tapintás-visszacsatolási megoldásokat –, valamint említést teszünk azon architekturális megoldásokról is, amelyek segítségével ezen rendszerek működőképesek lehetnek.

Az ötödik fejezet néhány különleges megoldást ismertet olyan tevékenységekhez, ahol különlegesen sok információt kell a felhasználónak értelmeznie, manipulálnia. Ez különösen olyan körülmények között nehéz, amikor a vizuális visszacsatolás sokkal érzékletesebb, mint a képernyőn olvasható adatok.

A hatodik fejezet a kiterjesztett- és kevertvalóság-rendszerekkel foglalkozik. Ebben a fejezetben bemutatjuk, hogy mennyiben különböznek az ilyen jellegű alkalmazásokhoz kapcsolódó rendszerek a tisztán virtuálisvalóság-rendszerekben alkalmazott megoldásokhoz képest. Kitérünk a megvalósítások nehézségeire is.

A hetedik fejezet részletesen foglalkozik a virtuálisvalóság-rendszerek emberi tényezőivel, a kapcsolódó betegségekkel és a társadalmi hatással. A fejezet kitér a közvetlen (pl. sérülések) és a közvetett hatásokra is. Mivel a kiberbetegség nagyon fontos eleme a közvetett hatásoknak, erről részletesen írunk.

A nyolcadik fejezet összegzi, hogy a közigazgatásban milyen módon lehet felhasználni a technológiának e területen elért eredményeit.

A Szerzők[1]

[1] *Dr. Vajda Ferenc*, a BME Villamosmérnöki és Informatikai Kara Irányítástechnika és Informatika Tanszékének egyetemi docense. PhD fokozatát a BME-en 2006-ban szerezte. Kutatási területe a virtuális- és kiterjesztettvalóság-rendszerek, számítógépes látás és vizualizáció.

Prof. Dr. Jakab László, a BME Villamosmérnöki és Informatikai Karának egyetemi tanára, dékánja (2016-2019), az Okos város - okos közigazgatás kutatóműhely szakmai vezetője. Villamosmérnök diplomáját a BME-n szerezte meg 1981-ben. A műszaki tudomány kandidátusa 1992-ben, habilitált doktor 2013-ban, az MTA doktora címet pedig 2014-ben szerezte meg. Jelenleg az Elektronikai Technológia tanszék munkatársa.

1. EMBER–GÉP INTERAKCIÓ, AZ ALAPOKTÓL

E kismonográfia célközönsége az okos város és az e-közigazgatás fejlesztés témakörében érintett, vagy a témakör iránt érdeklődő, önkormányzati vezetők, képviselők és szakemberek, az állami tisztviselőkről szóló 2016. évi LII. törvény 1. § szerinti állami tisztviselők. Ezenfelül egyetemi hallgatók, továbbá képzésükben, illetve továbbképzésükben részt vevő oktatók, és a digitális technológia adta lehetőségek iránt nyitó kutatók-fejlesztők. Célunk a tárgykörök tematikus, jól követhető módon való bemutatása. Először egy kicsit eltávolodunk a szigorúan informatikai szempontú megközelítéstől, és megpróbáljuk röviden összefoglalni, hogyan is áll jelenleg az ember és a gép kapcsolata, hétköznapi felhasználói szempontból. Legyünk e fejezet erejéig felhasználók, ügyintézők, ügyfelek.

A legegyszerűbb eseteket a háztartásban találhatjuk, például vegyük a 1.1. ábrán látható mikrohullámú sütő és mosogatógép kezelőfelületeket.

1.1. ábra: Mikrohullámú sütő és mosogatógép kezelőfelületek
(Forrás: a szerző felvétele.)

Mindkét készüléken találhatunk egy „menürendszert”, azoknak a funkcióknak a felsorolását, amelyek közül választhatunk. A választás érintéssel vagy gombnyomással történik, a készülék kijelzőjén információ jelenik meg, az egyes folyamatok, illetve azok időtartama, várható befejezése tekintetében. A menürendszer nem bonyolult, a tervezők törekedtek a könnyű kezelhetőségre, a nagy és jól olvasható betűméretre, szövegekre, a nagy méretű érintőfelületekre és gombokra.

Nagyon lényeges és itt szeretnénk kifejezetten kiemelni: felhasználói szempontból minden csoport – gyerekek, felnőttek, idős emberek – egyaránt fontos. Nem várhatunk el mindenkitől informatikai, számítástechnikai alapismereteket.

Negyven év felett sokan hordanak olvasószemüveget, 1,5-2 dioptriával. A 1,5 dioptria azt jelenti, hogy szemüveg nélkül minden homályos, ami 1 m-nél közelebb van, 50 cm távolságról a 3 mm-nél kisebb betűméretek is nehezen olvashatóak.

Ötven év felett már vannak, hatvan felett pedig nem is kevesen, akiknek remeg a kezük, a gépelés, nyomógombkezelés megy, az érintőképernyővel azonban lehetnek problémáik.

Hetvenéves életkor felett jelentős problémát okozhat sokaknak például a pénztárgépekhez csatlakozó PIN-egység kezelése, a PIN-kód hibátlan bevitele. Ez egyértelműen a túl kicsi nyomógombok és feliratok hibája.

Ha valamilyen információt szeretnénk a rendszerbe bevinni, tárolni, rögzíteni, továbbítani, a jelenlegi szinte egyetlen megbízható módszer a billentyűzet használata. A billentyűzethez valamilyen megjelenítő, például monitor kapcsolódik, így láthatjuk a műveleteink eredményét. Ez már a kommunikáció, vagy interakció, alapfoka, amelyre a korábban említett háztartási gépeink még nem képesek, bár ma már születnek minden területen „smart”, vagyis okos, okosított berendezések is.

Billentyűzetre és monitorképre az 1.2. ábrán hozunk példát. Nem azért, mintha nem látott volna mindenki már ilyent, hanem azért, mert fel szeretnénk hívni a figyelmet néhány szempontra.

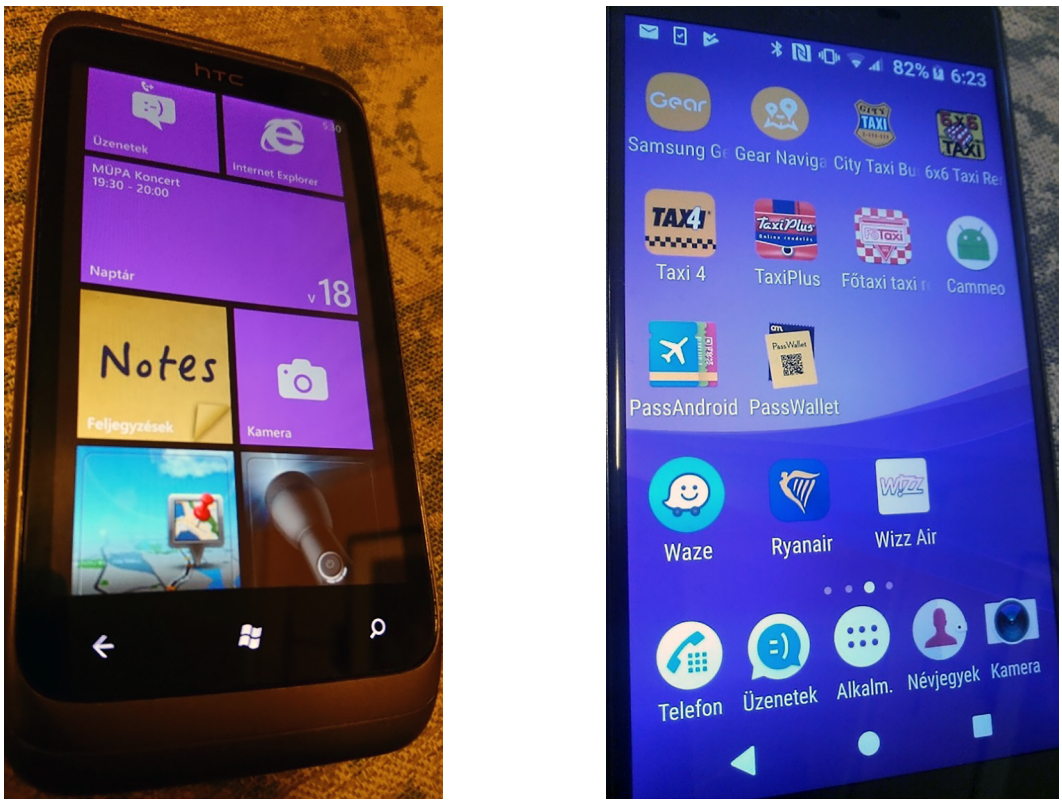
1.2. ábra: Számítógép (notebook) billentyűzete és monitorképe (Windows 10-rendszer) (Forrás: a szerző felvétele.)

Először vegyük észre, hogy a billentyűzet magyar karakterkiosztású. Német szövegre már körülményesen használható. Tartalmaz magyar ékezetes betűket, a billentyűk mérete megfelelő, de a hellyel takarékoskodni kell, ezért speciális karakterek, pl. a @, az & vagy a $ már csak két billentyű használatával érhetőek el. A zárójel még megvan (.), de a szögletes zárójel már eltűnt. Legalább a számok használata egyszerű. Vagyis billentyűzet csak kompromisszum árán készíthető.

Ugyanez igaz a monitorképre is. A monitorokon úgynevezett ikonok jelképezik az egyes programokat, legyenek azok egyszerű utasítások vagy bonyolult szerkesztő-rendszerek. Az ikonok közül egy ún. egér mozgatásával tudunk választani, az egérmutatót az ikonra helyezve, nyomógomb megnyomásával (kattintással). Ez valamennyiünk számára már ismerős lehet, jelen esetünkben az egeret a notebook billentyűzete előtt elhelyezett érintőfelület (touchpad) helyettesíti. Koppintani, nyomkodni a felület felénk eső részén, bal, illetve jobb oldalon, a bal, illetve a jobb oldali egér gombot helyettesítve lehet. A Windows 10-es rendszerben a hagyományos ikonokat a Microsoft a mobiltelefonos rendszerből átvett „csempékkel” egészítette ki. Ezekre a későbbiekben még visszatérünk.

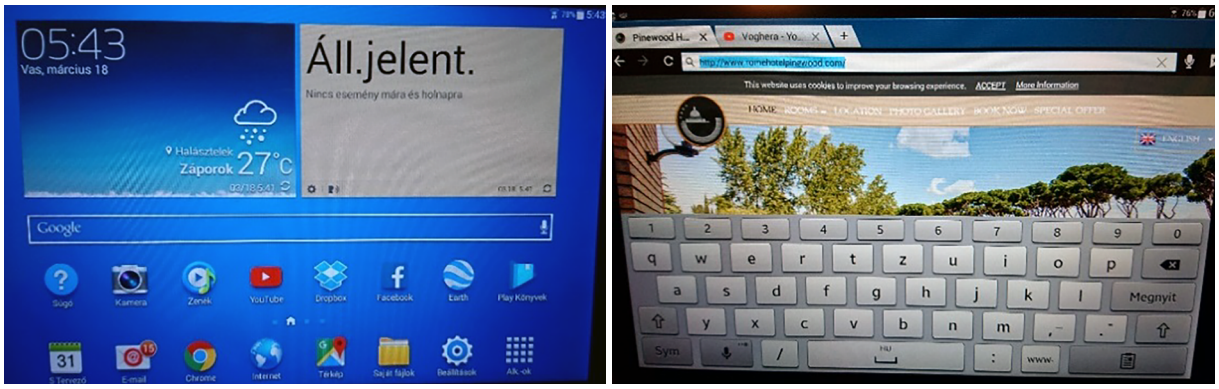
E részletes leírással szerettük volna felhívni a figyelmét mindenkinek arra, hogy a jelenlegi technikai szinten milyen primitív és nehézkes lehetőségeink vannak arra, hogy közöljük egy géppel, mit szeretnénk. És, persze, írógépelni is valamilyen szinten mindenkinek meg kell tanulnia.

Az elmúlt tíz évben kismértékű előrelépést az okostelefonok megjelenése és az érintőképernyők használata hozott. Erre két példát az 1.3. ábrán hozunk.



1.3. ábra: Mobiltelefon-képernyők,
bal oldalon Windows Phone, jobb oldalon Android operációs rendszerrel
(Forrás: a szerző felvétele.)

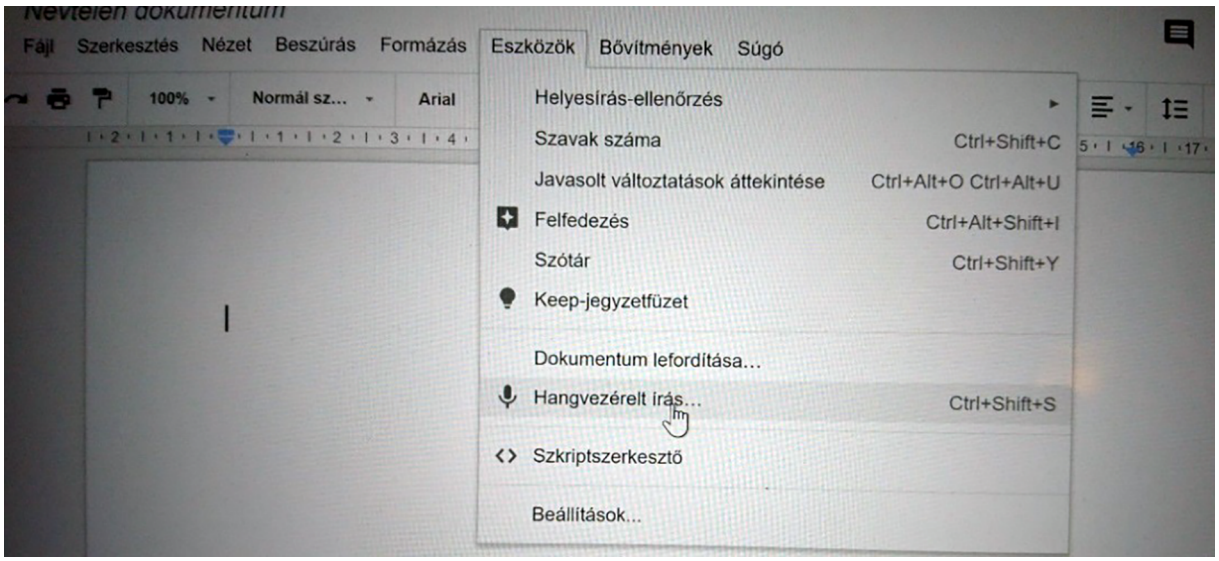
A csempék és ikonok szerepe hasonló. Egy csempe vagy ikon megnyomásával, érintésével tudjuk a telefont elemlámpaként használni, de más alkalmazások letöltésével lehet iránytűnk, vízmértékünk, hangerő-, illetve légnyomásmérőnk is. Mellesleg telefonálni, üzenetet küldeni is lehet a készülékekkel. Az érintőképernyő használata, az okostelefonokkal egy időben, a billentyűzet (klaviatúra) nélküli úgynevezett tabletek megjelenését is lehetővé tette. Erre az 1.4. ábrán egy androidos példát hozunk; Windows-rendszer is létezik, bár éppen a piacról kivonulóban van.



1.4. ábra: Tablet-képernyő (bal oldalon),
alkalmazásból előhívható érintő billentyűzettel (jobb oldalon)
(Forrás: a szerző felvétele.)

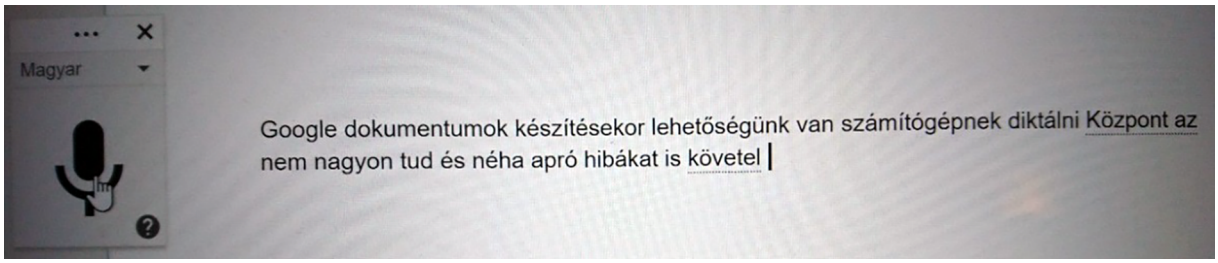
Láthatjuk, hogy az érintőképernyő megjelenésével bizonyos alkalmazások használata egyszerűbbé válhat, de az információ-, illetve szövegbevitelre továbbra is csak a billentyűzetünk van. Az érintőképernyőn írógépelni nem egyszerű, de a telefont két kézbe véve, két hüvelykujjal egészen nagy sebesség is elérhető. A módszer, ha kommunikáció vagy interakció szempontjából nézzük, még mindig nem érdemi előrelépés.

A beszédfelismerési és beszédszintetizálási technikák fejlesztésének is nagy hagyományai vannak. A jelenlegi szint illusztrációjaként megemlíthetjük a televízióban nem olyan régen, de már használt automatikus beszédfeliratozást, vagy a Google Drive dokumentumkészítés menüjének a „hangvezérelt írás” funkcióját, lásd 1.5. ábra.



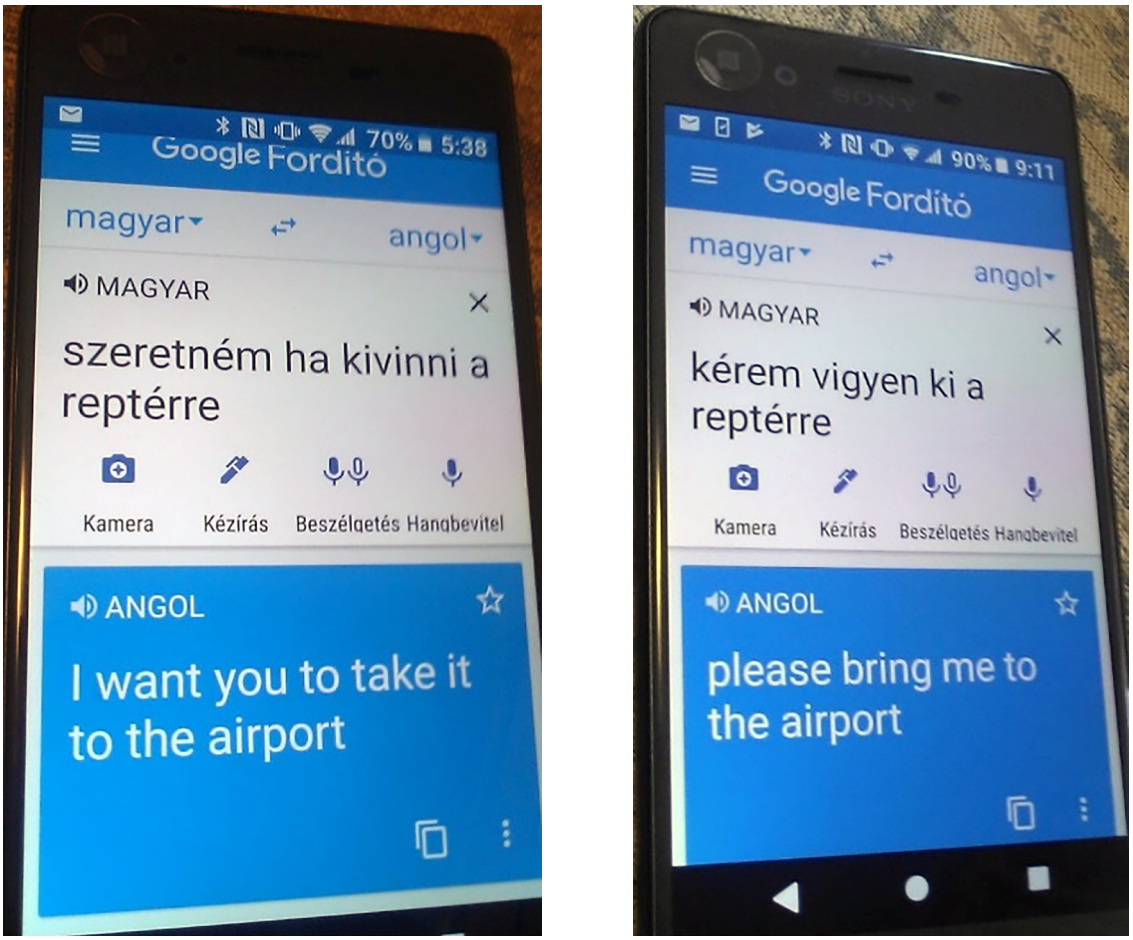
1.5. ábra: Hangvezérelt írás funkció a Google Drive dokumentumszerkesztés menüjében
(Forrás: a szerző felvétele.)

Csodákra persze nem kell számítani. Az már nagy eredmény, hogy a rendszer tud magyarul, de a mikrofonba mondott szöveg minőségétől nem lehet eltekinteni. Kiejtés, artikuláció, hangerő, hangsúlyozás mind sokat számítanak. Ennek ellenére az eredmény meglepően jó is lehet, ahogy a 1.6. ábrán láthatjuk.



1.6. ábra: Diktált szöveg a Google Drive-on
(Forrás: a szerző felvétele.)

A gép szövegértésének korlátai a „központozni” helyett a „Központ az”, illetve a „követ el” helyett a „követel” szövegrészeknél mutatkoznak meg. Mobiltelefonos alkalmazásban érdekes lehet még a fordítóprogram. Elég jól fordít szöveget magyarról angolra, és vissza is tudja mondani, mindkét nyelven, gépi beszédszintézissel, ezt mutatjuk az 1.7. ábrán. A „Szeretném, ha kivinne a reptérre” szöveggel a program azonban nem boldogul. Többszöri próbálkozással is a bal oldali helytelen szöveget adja vissza, amit viszont lefordít angolra. Ez viszont nem pontosan az, amit mi a taxisofőrrel közölni szeretnénk, bár a sofőr saját maga valószínűleg kitalálja a megoldást. Angol nyelvtudás hiányában kénytelenek vagyunk a magyar szöveget átfogalmazni, hogy a megfelelő eredményt kapjuk (jobb oldali kép).



1.7. ábra: Gépi fordítás hangbemondásra
(Forrás: a szerző felvétele.)

Végül az eredmény hibátlan. Összefoglalva mondhatjuk talán, ha rajtunk múlik, főleg emberi környezetben, inkább a hangbemondásos változatot választanánk. Bár elég furcsa egy géppel beszélgetni.

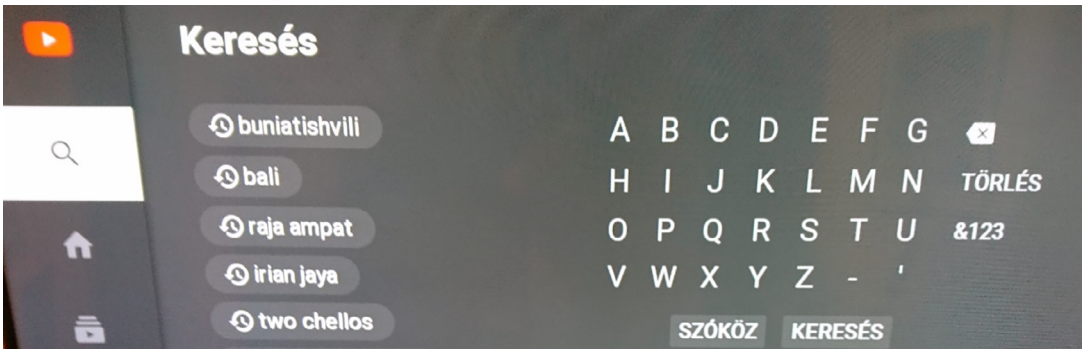
Az érintőképernyős menürendszerek használatára sok példát találunk bankfiókokban, mobiltelefon-szolgáltatóknál. Sokféle funkció és ügyintézés közül választhatunk, ha a főmenü és almenük erdején átjutunk, és kapunk sorszámot. A rendszer nagyon ügyfélbarát lehet, feltéve, hogy megtaláljuk a menüben, amit keresünk. Számos helyen egy munkatárs áll az érintőképernyő mellett, neki elmondjuk, mit szeretnénk, s ő választ nekünk sorszámot a gépen. Ehhez előre meg kell tanulnia a menürendszert.

Még néhány olyan példát szeretnénk felhozni, ami egyértelműen az ember–gép kapcsolat problémáit mutatja be. Az első egy sokfunkciós digitális óra, egy másik pedig egy tv-távirányító (1.8. ábra).

1.8. ábra: Sokfunkciós digitális óra és egy tv-távirányító
(Forrás: a szerző felvétele.)

Az óra négy fekete nyomógombbal rendelkezik. Ezek segítségével tudjuk beállítani a pontos időt, dátumot, időzónát, választhatunk stopper és ébresztő funkciót és így tovább. Az órához, ami egy korszerű, friss modell, ötoldalas leírást kapunk. Vagy visszük a leírást magunkkal, vagy esélyünk sincs az óra szolgáltatásait teljeskörűen kihasználni.

Másik jellemző példa a tv-távirányító. Ez már évtizedek óta része az életünknek, általában több is van belőle (CD, DVD, rádió, set top box). Az okos tv megjelenésével olyan alkalmazásokhoz férünk hozzá az internetre csatlakoztatott tv segítségével, mint a hagyományos számítógéppel. Van internetböngészőnk, közvetlen YouTube-csatornánk és sok más, máshonnan ismerős alkalmazásunk, akár internetes tv-szolgáltatások is elérhetőek lehetnek. Hogyan kommunikálunk a tv-vel? Természetesen a távirányító segítségével, mutatjuk is hozzá a tv-képernyőjén megjelenő menüt az 1.9. ábrán.



1.9. ábra: Okos tv menü keresés funkciója
(Forrás: a szerző felvétele.)

A távirányító közepén található négy különböző irányba mutató nyíllal tudunk az ABC szerint elrendezett karakterekre a képernyőn rámutatni és a távirányítón a nyilak között található „bevitel” vagy „enter” gombbal a betűt kiválasztani. Lássuk be, ez még a régi, korábbi hagyományos telefon-billentyűzeten írt SMS-küldésnél is primitívebb technika. Ráadásul a jobb nyíl gombja alatt található „exit” gomb véletlen megnyomása kiléptet az egész alkalmazásból. Nagyon hiányzik a billentyűzet, akár érintőképernyős változatban is vagy a megbízható hangvezérelt funkció.

Beszélnünk kell még egy olyan eszközcsaládról, amely a hétköznapi alkalmazását, feladatait és funkcióját nem találta meg, de hosszú távon érdekes szerepe lehet, akár az ember-gép kapcsolat szempontjából is. Ezek pedig az okosórák (1.10. ábra).

1.10. ábra Okosórák, mint a telefon és az ember közötti kapcsolat elemei
(Forrás: a szerző felvétele.)

Az okos órákat karon viselve hozzáférünk a mobiltelefonunk funkcióihoz. Időjárás, naptár szerinti időbeosztás, telefon megkeresése, zenelejátszás, ébresztőóra és beállítások menüpontokat látunk a bal oldali képen, a jobb oldalon pedig az időjárási adatokat. SMS-ek és e-mailek, navigációs és egyéb funkciók is elérhetőek. Sajnos, a kezelőfelület kicsi, a szövegek apró betűi nehezen olvashatóak.

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy az informatika néhány évtizedes látványos fejlődését nem követte az ember–gép interakció fejlődése. Ezért a virtuális- és kiterjesztettvalóság-módszerek fejlődésére és fejlesztésére nagy szükség van.

2. AZ EMBER–GÉP-KAPCSOLAT FEJLESZTÉSÉNEK SZÜKSÉGESSÉGE

Ebben a fejezetben bemutatjuk a jelenkor fontosabb problémáit és kihívásait, amellyel az embernek a számítógéppel történő kapcsolata során kell szembenéznie. Korunkban gyakorlatilag elválaszthatatlanok vagyunk a számítógéptől és egyre több információt szeretnénk cserélni a számítógéppel, számítógépes hálózatokkal, mialatt az az eszközkészlet, amit használunk (egér, billentyűzet, monitor), olyan időszakban került kialakításra, amikor ember és gép között ennyi adatáramlásra nem volt szükség.

2.1 Szövegbevitel

A szövegbevitelre gyakorlatilag egyetlen jól működő megoldásként billentyűzetet használunk. Ennek eredete az írógépek korából való, azóta azonban sokat fejlődött a technológia, sokkal jobban képesek vagyunk az ember természetes mozgását követni, értelmezni, ezért alternatív megoldások keresésére is szükség van. Ráadásul virtuális-valóság-rendszerekben gyakran egyáltalán nincs lehetőség billentyűzet használatára.

A billentyűzetről kevesen tudják, hogy a jelenleg használt billentyűzetkiosztások kifejezetten úgy lettek kialakítva, hogy minél lassabban gépeljünk. Ennek eredete szintén az írógépekre vezethető vissza, ugyanis az eredeti billentyűzeteken a betűk ABC-sorban helyezkedtek el, de a felhasználók olyan gépelési sebességet értek el, amit a mechanika nem tudott követni, a billentyűk összeakadtak, ami összességében nagyon lelassította a munkát. Matematikusok, statisztikai módszerekkel, kialakítottak egy olyan billentyűzetkiosztást, amely nagyon megnehezíti a munkát, olyan mértékben lelassítva, hogy a mechanika követni tudja, így megszűntek az összeakadások és az eredő sebesség nagyobb lett. A mai billentyűzetek értelemszerűen ezt a problémát nem hordozzák, de sajnos a „megszokás” miatt a számos billentyűzetreform-kísérlet egyike sem sikerült, máig olyan megoldást alkalmazunk, ami többszörösére lassítja a gépelést.

A billentyűzeteknek nem ez az egyetlen problémája. Bár az egér még súlyosabb gondokat okoz [Wærsted et al. 2010], a hagyományos billentyűzetkialakítás (a laptop-billentyűzetekre ez még inkább igaz) egyáltalán nem kedvez a csontrendszerünknek. Ennek ellenére viszonylag kevés kutatás irányul a billentyűzet kiváltására.

Az egyik leginkább ismert kiváltó megoldás a *hangalapú szövegbevitel*. Angol nyelven már nagyon jó minőségben működő megoldások elérhetők, a magyar nyelv azonban jóval komplexebb a ragozás miatt, jóval több szót tartalmaz (a hangalapú felismerés nem betűk és nem is morfémák felismerésére épül, sokkal inkább szavak, szószerkezetek felismerésére). Ennek ellenére már magyar nyelven is viszonylag jól használható megoldások vannak. A hangalapú szövegbevitel egyik nehézsége, hogy sokszor összekapcsolják hangalapú vezérléssel és annak szétválasztása, hogy vezérlést, szöveget, esetleg egy írásjelet szeretne a felhasználó közölni a rendszerrel, alapvető nehézségeket okoz. A másik ok, ami miatt ez a rendszer a legtöbb esetben egyáltalán nem használható, hogy a számítógéppel való kommunikáció során zavarjuk a környezetünkben lévő további felhasználókat.

A másik – egyelőre még nem teljesen kiforrott – megoldás a *mozdulatokkal történő szövegbevitel*. Ennek egyszerűbb (és viszonylag jól működő) változatai már mobiltelefonokon elérhetőek (pl. Swype, SwiftKey). A felhasználó a képernyőn található billentyűzeten a gépelni kívánt szó betűin áthaladva írja be a szavakat. Az eljárás mögött mindig egy intelligens tanulórendszer helyezkedik el, ami nem azt vizsgálja, hogy pontosan milyen betűkön haladunk át (számos olyan betűn is, amit a szó nem tartalmaz), hanem hogy milyen útvonalon. Ez azért szerencsés, mert kisebb pontatlanságok (akár több betű „elvétése") ritkán okoznak problémát, mivel az adott útvonalon más értelmes szó nem található (az okozott tévedések általában erre vezethetők vissza – pl. szó/dió, table/take, value/bake/cake).

Természetesen olyan megoldásokkal is kísérleteznek az alternatív felhasználói felületek területén tevékenykedő kutatók, ahol kisebb vagy nagyobb kézmozdulatokkal vezérelt, a fent említett alapelvekre épülő tanulómegoldást kínáljanak. Ezek egyik fő nehézsége, hogy a levegőben nem látjuk a betűket, komoly tanulási fázisnak kell megelőznie az érdemi használatot (hasonlóan a vakon gépeléshez).

2.2 Grafikus felületek

A grafikus felületek is a hatvanas évekre vezethetők vissza, többek között Ivan Sutherland („a számítógépes grafika atyja") munkásságára, aki egyben a fejre szerelhető megjelenítők atyja is. Ő hozta létre 1962-ben a világ első teljesen interaktív grafikus felületét, a Sketchpadot, amelyen többek között a képernyőn fényceruzával lehetett rajzolni, illetve a világ első nem procedurális nyelvét is tartalmazta és az első objektumorientált szoftverrendszer is volt egyben. Az első ablakos rendszer (PARC) azonban a XEROX műhelyeiben jelent meg a '70-es évek elején, ahogyan náluk jelent meg az egér, a raszteres kép, a lézernyomtató, a WYSIWYG-szövegszerkesztés, az objektumorientált programozás és az internet alapjai (a DARPAnet a XEROX eszközeivel építkezett).

Azóta ez a felület nem sokat változott. Természetesen a grafikus arculat nagyon más lett, és egyéb apróbb változások is megjelentek, de lényeges változáson nem esett át a napi szinten használt grafikus felületek világa. Az egyetlen, ami változott, hogy ma már szinte mindenki ezt használja és az emberek többsége úgy gondolja, hogy ennél nem is nagyon lehet jobbat kitalálni. Annak ellenére, hogy számos kutató megmutatta, hogy ez a megközelítés számos feladatra nem igazán megfelelő. Sok kísérlet történt már egyes feladatok esetében ennek a rendszernek a kiváltására, de az idő előrehaladtával egyre inkább ezt használjuk olyan termékekben is, ahol inkább kárt okoz, mint hasznot (elektronikus mérőeszközök – pl. logikai analizátorok, mobil eszközöknél is megjelent már az átlapolódó ablakok rendszere stb.).

A terület legelismertebb kutatója, Jeff Raskin számos cikkében és könyvében [Raskin 2000] foglalkozott a felhasználói felületekkel. A fő álláspontja, hogy a felhasználói felületeket amennyire lehet, annyira egyszerűre kell tervezni és mindig az adott feladathoz kell igazítani. Alapvetően rossz megoldásnak tartja, hogy egy olyan felhasználói felületet készítünk, amely „mindenre jó" (pl. ablakozó rendszerek), bár kétségtelen előnye, hogy csak egy rendszert kell megismernünk, ami többé-kevésbé használható a legtöbb feladatra. Mint írja [Raskin 2000]:

„Where most of the users' time will be spent on routine operation of the product and where learning is only a small part of the picture, designing for productivity – even if that requires training – is often the correct decision."

Tipikus példaként említi azt, hogy olyan esetekben, ahol a szövegszerkesztés alapvető tevékenység, az egymás mögött elhelyezkedő ablakok és az egér használata szükségtelen, sőt kifejezetten zavaró. Ugyanakkor olyan esetben, amikor háromdimenziós objektumok megjelenítése és manipulációja a fő feladat (pl. építészet, mérnöki tevékenységek, orvosi alkalmazások), vagy éppen nagy mennyiségű adatokban való keresés a feladat, a háromdimenziós munkafelületek nyújthatnak hatékony alternatívát a mindennapi munkavégzésre.

A fentieken felül szintén kiemelt jelentőségű, hogy az egér használata előbb-utóbb egészségügyi problémákat okoz [Wærsted et al. 2010] a felhasználók többségének (tipikusan ínhüvelygyulladás, de egyéb elváltozások is lehetnek). Ráadásul az egér és a billentyűzet közötti rendszeres váltás is sokat lassít a munkán, ezért aki gyakran használ egy alkalmazást, célszerű azon billentyűzetkombinációkat megtanulnia, amellyel csökkenteni tudja az egérrel való manipuláció mennyiségét (valójában szinte teljesen elkerülhető az egérhasználat, ha az ember nem használ grafikát az ablakozó rendszeren belül).

A virtuálisvalóság-rendszerek és a 3D-s felhasználói felületek alkalmazása során a hagyományos grafikus felületek nagyon korlátozottan (vagy inkább nem) használhatóak, ezért ezekhez újabb megoldásokat kell kialakítani.

2.3 Nagy munkafelületek, sok információ kezelése

Az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb mennyiségű adattal, egyre több alkalmazással dolgozunk, egyre több információt szeretnénk egyidejűleg megjeleníteni és hatékonyan használni. Ez a hagyományos grafikus felületekkel nem igazán lehetséges, ezért többféle alternatív irányvonal is kialakult.

Az egyes megoldások mindegyike azt problémát próbálja valamilyen módon kezelni, hogy a felhasználó nem képes egyidejűleg sok információt befogadni, átlátni, ezért mindig csak azon adatok jelenjenek meg, amelyekre éppen szüksége van. Az azonban, hogy a felhasználó hogyan adhatja meg a megjeleníteni kívánt adatok „körét”, nem igazán egyszerű kérdéskör.

Egyik megoldás, hogy a felhasználó az adatokat távolról is megtekintheti, ugyanakkor a részletek nagyításával (hasonlóan nagy felbontású képekhez vagy térképes megoldásokhoz) a részletek megvizsgálásra is lehetőség nyílik (ZUI, Zoomable User Interfaces). Egy másik megoldásban az információk háromdimenziós térben jelenhetnek meg, amelyben a felhasználó tetszőlegesen mozoghat és úgy tekintheti át az összefüggéseket (3DUI, 3D User Interfaces).

Ezekről a megoldásokról az 5. fejezetben írunk részletesebben.

2.4 Mobil eszközök használata

Napjainkra nagyon nagy mértékben elterjedtek az okos mobiltelefonok, amelyek teljesítménye, megjelenítőrendszere, szenzorai olyan összetett feladatok elvégzésére teszik alkalmassá, amelyekre korábban nem volt lehetőség. A lehetőségek növekedésével párhuzamosan az igény is megjelent, hogy amit csak lehet, mobil eszközökön végezzünk.

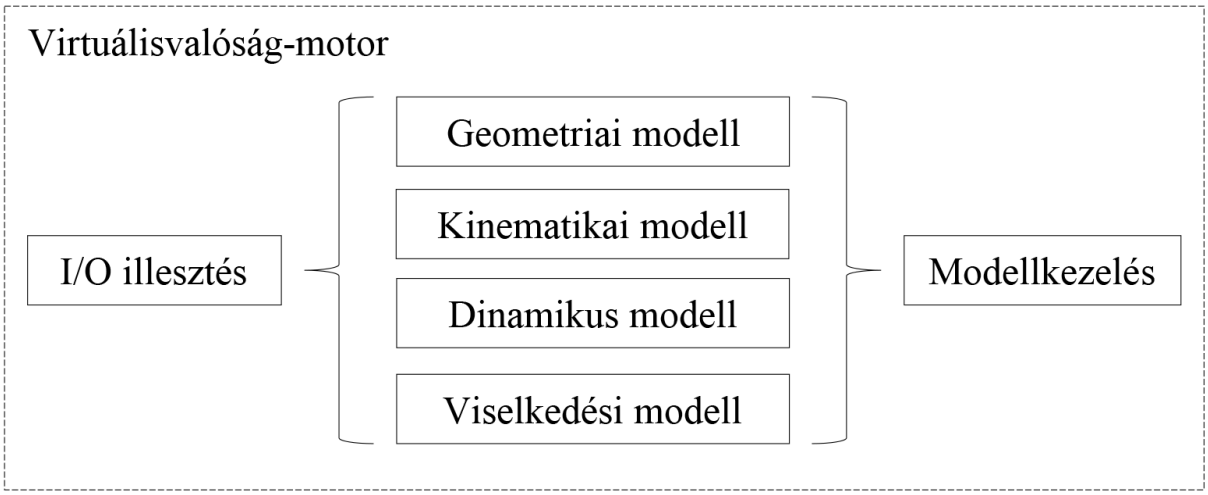
Ennek köszönhetően a kiterjesztettvalóság-rendszerek is komoly fejlődésnek indultak. A telefonok kameráját és a beépített szenzorokat felhasználva a mobiltelefon információkkal rendelkezik arról, hogy hol vagyunk, milyen irányba néz a telefon; a központi adatbázisok vagy akár helyi adatok alapján kiegészítő információkat adhat a kameraképhez és együttesen megjelenítheti.

A mobil technológia a kiterjesztettvalóság-megoldásokon felül lehetővé teszi, hogy kamerája segítségével számítógépes látó algoritmusokat futtatva gesztusvezérelt megoldásokat alkalmazzunk. Lehetőség van továbbá arra is, hogy megfelelő kiegészítőkkel a kijelzőt közvetlenül a szemünkbe juttatva fejre szerelhető kijelzőként alkalmazzuk (l. még4.5.4 szakasz). És természetesen a számos beépített szenzornak köszönhetően nagyon sokféle egyéb feladatot megoldhatunk mobil eszközökkel.

3. VIRTUÁLISVALÓSÁG-RENDSZEREK FELÉPÍTÉSE

A virtuális valóság (VR) olyan felhasználó-számítógép felület, amely lehetőséget biztosít a felhasználó számára, hogy számítógép segítségével valós idejű szimulációval generált, valós méréseken alapuló vagy elképzelt környezetben több szenzoros visszacsatolással interaktív módon végezhessen tevékenységet. Ez tehát olyan számítógéppel létrehozott környezet, amelyben a felhasználó is jelen van. Ezt a technológiát azért hozták létre, hogy az emberek könnyebben kezeljék az információt, lehetővé teszi az információ teljesen más szemléletét, melynek egyik jellemzője a dinamikusság és közvetlenség. A virtuális világ interaktív, reagál a felhasználó cselekedeteire. A VR képes létrehozni az immerzivitás érzését, azaz a perceptuális és pszichológiai érzetét annak, hogy a digitális világban vagyunk.

A virtuálisvalóság-rendszerek számos komponensből épülnek fel, ezért többnyire külön tervezni kell a rendszer felépítését. A rendszer felépítésekor figyelembe kell venni, hogy számos modell alkotja a teljes rendszert és ezen modelleket össze kell hangolni, amely önmagában is komoly feladat lehet. Az alábbi ábra szemlélteti, hogy milyen módon illeszthetünk össze virtuálisvalóság-rendszereket [Burdea–Coiffet 2003].



3.1. ábra: Virtuálisvalóság-rendszerek tipikus felépítése
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

A virtuálisvalóság-motor (VR-motor) feladata, hogy kezelje a rendszerkomponenseket. Az alábbiakban röviden összefoglaljuk ezek feladatát.

Az első lépés a rendszerhez kapcsolódó fizikai **eszközök illesztése**. Fontos feladata a bemenő jelek feldolgozása, értelmezése, a többi komponens számára érthető formába alakítása, illetve szükség esetén az egyes szenzorok fúziójának megoldása és predikciós eljárásokkal olyan értékek előállítása, amire a többi modell építeni tud. Szintén ennek a komponensnek a feladata a megjelenítőeszközök vezérlése, a vizuális

rendszer, a hang-, illetve a tapintás- és erővisszacsatolás megjelenítése. Leggyakoribb bemeneti eszközök a különféle követőeszközök, amelyek a környezet vagy a felhasználó valamely testrészének pozícióját és orientációját írják le, de fontos szerepet játszanak a gesztusok felismerésére szolgáló eszközök is. A megjelenítés manapság leggyakrabban a fejre szerelhető megjelenítőket jelenti, de számos esetben alkalmazunk falra vetítéses vizuális megjelenítést, illetve az egyéb érzékszerveink stimulálása is fontos feladat lehet.

A **geometriai modell** feladata, hogy a virtuálisvalóság-rendszerben található objektumokról megfelelő információkat tartson nyilván. A minden pillanatban frissített geometriai modell alapján a VR-motor előállítja a megjelenítők számára a raszteres képeket. A geometriai modell tipikusan háromszögekre épülő modell, mert ezt lehet a legkönnyebben megjeleníteni, illetve különféle hatások esetén (pl. ütközések) ezen a modellen lehet legegyszerűbben elvégezni az esetleges módosításokat, torzításokat. A geometriai modell ezenfelül a megjelenítéshez szükséges további információkat, textúrákat, színeket, reflexiós és szóródási információkat stb. is tartalmaz.

A **kinematikai modell** az egyes objektumok mozgását, illetve a rendszerben található számos koordináta-rendszer közötti kapcsolatot írja le. A megjelenítés során minden esetben megfelelő homogén transzformációval kell az objektumok csúcspontjait a kamerák koordináta-rendszerébe transzformálni. A transzformációs mátrix számítása az összekapcsolódó koordináta-rendszerek egymáshoz képesti viszonyából, illetve a mozgás során, szintén időfüggő homogén transzformáció segítségével leírt mozgásból, forgásból tevődik össze. A kinematikai modell átnyúlik a virtuális téren, és a valós objektumok, követőeszközök koordináta-rendszerét is összekapcsolja a megjelenítőközpont koordináta-rendszerével, ezáltal viszonylag könnyű a fizikai és a virtuális objektumok illesztése (természetesen a pontos követés önmagában nehéz feladat). A kinematikai modell a pozíciót, a sebességet és a gyorsulást (ill. szöget, szögsebességet és szögygyorsulást) használja fel a transzformációk számítására.

A **dinamikus modell** (más néven fizikai modell) a virtuális objektumok fizikai tulajdonságait írja le. A fizikai modell határozza meg, hogy az egyes virtuális objektumokra milyen erők hatnak (felhasználva számos fizikai összefüggést, mint az impulzusmegmaradás, tehetetlenség, viszkozitás, rugóerő stb.). A fizikai modell adja meg a kinematikai modellnek az egyes objektumokra vonatkozó sebesség- és gyorsulásadatokat. Értelemszerűen a fizikai modell határozza meg azt is, hogy mely tárgyak ütköznek egymással, mivel ez befolyásolja a tárgyak sebességét és gyorsulását is. A kinematikai modell elvégzi a forgatást, de a dinamikus modell feladata eldönteni, hogy van-e szükség forgásra. A kinematikai modell alapvetően mátrixszorzásokkal végzi el a feladatokat, de a forgás, illetve a forgásváltozás megfelelő leírására az kevésbé alkalmas, ezért a fizikai modellben általában kvaterniós megközelítést alkalmazunk, amely leegyszerűsíti a dinamikus modell feladatát [Ickes 1970].

Az ütközés kezelése egy rendkívül számításigényes feladat, ezért ezt sok esetben leegyszerűsítik (bármelyik objektum bármelyik pontja érintkezhet egy másik objektum másik pontjával, amit ellenőrizni kell és mivel a számítások időben is kvantáltak, ezért két számítás között sok eltérés lehet – akár át is eshet egyik tárgy a másikon, egyik képkockán sem találkozva a másik tárggyal). A leegyszerűsítésnek sok eleme van. Egyrészt a részletesen kidolgozott geometriai modellhez kapcsolódik egy rendszerszinten hasonló, ugyanakkor nagyon leegyszerűsített modell, amelyet a dinamikus modell használ. Ez a modell alapvetően szilárdtestmodell, háromszögek helyett primitív testeket tartalmaz (általában sík, téglatest, gömb, kapszula – henger két oldalán két félgömb; a további testek már képesek nagyon elbonyolítani a rendszert). Másrészt külön elemzik, hogy

mely térrészben található objektumok ütközhetnek egyáltalán egymással, így kevesebb vizsgálat is elegendő.

Szükség esetén a dinamikus modell gondoskodik az egyes objektumok deformációjáról (ütközés vagy ruha szimulációja), szakadásáról, töréséről (modell kettéválasztása), ilyen esetben a dinamikus modell a geometriai modellel is közvetlen kapcsolatba kerül.

A **viselkedésmodell** feladata, hogy a környezetben található objektumok és élőlények szabályok szerinti változásait kezelje. Ez lehet egy óra számlapja, egy automatikusan záródó ajtó, de ugyanide tartozik a stratégiában gondolkodó és mozgó emberek szimulációja is. A viselkedésmodellre nincsenek általánosan rögzített megoldások, eljárások. Minden esetben egyedi megoldásra van szükség.

A **modellkezelés** feladata, hogy a rendkívül komplex modellrendszert összefogja és a rendszer erőforrásainak függvényében mindig fontossági prioritás alapján vezérelje az egyes modellek részletességét. A modellkezelés során dől el, hogy milyen részletességgel jelennek meg a háromszögek, mennyire lesz pontos a fizikai szimuláció (mennyire ellenőrzi a ritkán előforduló anomáliákat), illetve mennyire lesz intelligens az adott virtuális személy. A modellkezelés szintén egy rendkívül komplex feladat, sok esetben csak valamilyen kis részegységét valósítják meg – vagy azt sem, ami sok nehézséget okoz egy virtuálisvalóság-rendszernek úgy a megjelenítés, mint a sebesség és egyéb paraméterek terén.

4. A VIRTUÁLIS ÉS A KITERJESZTETT VALÓSÁG ESZKÖZKÉSZLETE

Az alábbiakban ismertetjük a jelen pillanatban rendelkezésünkre álló eszközöket, amelyek a 2. fejezetben felvázolt problémákat és igényeket hivatottak kezelni. Megpróbáljuk összefoglalni az egyes megoldások előnyeit és hátrányait, illetve, hogy milyen környezetben alkalmazhatók célszerűen. Az eszközök terén kitérünk mind a fontosabb beviteli eszközökre, mind a megjelenítőeszközökre. Röviden foglalkozunk azon számítási architektúrákkal is, amelyek érintettek az ilyen rendszerekben a felmerülő számítási kapacitásigény miatt [Burdea–Coiffet 2003].

4.1 Követőeszközök, manipuláció

Háromdimenziós környezetekben az egyik legfontosabb információ, amit fizikai eszközök szolgáltathatnak, egy objektum, emberi testrész stb. pozíciója, illetve orientációja [Rolland et al. 2001]. A háromdimenziós objektumok pozíciójának és orientációjának változását valós időben mérő hardvereszközöket együttesen követőeszközöknek (tracker) nevezzük. Mivel ilyen eszközök nélkül virtuálisvalóság-rendszerek gyakorlatilag elképzelhetetlenek, rendkívül sokféle megoldást alkalmaznak a kutatóműhelyeken kialakított és a kereskedelmi forgalomban kapható eszközök. Ebben a szakaszban ezek hátterét és működési elvét ismertetjük.

4.1.1 Követőeszközök paraméterei

A követőeszközöknek számos kritikus paramétere van, amelyek technológiától függően eltérő mértékben jellemzik az eszközt. Minden esetben az alkalmazástól függ, hogy mely paraméterek fontosabbak, és az alapján érdemes technológiát is választani. Sok esetben több követőeszköz együttes alkalmazása vezet csak az elvárt értékekhez.

Fejre szerelhető megjelenítők esetén, virtuálisvalóság-környezetekben mindig alkalmazunk követőket, hogy a felhasználó fejének pozícióját és orientációját ismerjük és ettől függően változtassuk a szembe jutó látványt (ill. a fülbe jutó hangot). Az alább ismertetett paraméterek mindegyike igen kritikus lehet, gyenge paraméterek könnyedén rosszulléthez (kiberbetegség) vezetnek.

A **pontosságot** (accuracy) a tárgy valódi pozíciója és a követőeszköz méréseiből származtatott eredmények különbsége határozza meg. Minél pontosabb egy eszköz, annál alacsonyabb ez a különbség. A követőeszközökben egymástól független érték a pozíció és az orientáció pontossága, amelyet milliméterben, illetve fokban adnak meg. A legtöbb esetben a pontosság nem egyenletes a munkatérben, a referenciaponttól vett távolság függvényében csökken. A még éppen elfogadható pontossághoz tartozó távolság határozza meg az eszköz működési tartományát, a munkateret. Erre azért fontos ügyelni, mert az eszközök a megadott működési tartományon kívül is szolgáltatnak eredményt, illetve befolyásolják a környezetet, ezért több eszköz abban az esetben is zavarhatja egymást, ha a működési tartományuk nem fed át.

A pontosság nem összekeverendő a **felbontás**sal, ami a mérőeszköz fizikai paramétere, a minimális változás finomsága, amelyet az érzékelő érzékelni tud. Ez az érték sok esetben akár több nagyságrenddel eltér a pontosság nagyságrendjétől.

A **remegés** (jitter) értéke a követőeszköz kimenetének változása rögzített objektum esetében. A remegés a mérés megismételhetőségét jellemzi, rögzített objektum mérései során nagyjából gömbszerű (jobbára gauss) eloszlást mutat. Ha a remegés értéke 0, akkor fix objektum esetén a kimenet minden esetben ugyanaz (természetesen a pontosság függvényében eltérhet a valós értéktől). A remegés minimális értéken tartása nagyon fontos fejkövetés esetén, mert a grafikus visszacsatolás minősége nagy mértékben romlik a remegő, ugráló tárgyak miatt. A remegést minden esetben szenzorzaj okozza, méréstechnológiai probléma. Több mérés átlagolásával a remegés mértéke csökkenthető, ugyanakkor ez egy másik paraméter, a késleltetés értékét rontja. A remegésre is jellemző, hogy mértéke a munkatér egyes területein eltérő lehet, illetve mértékét a környezet is befolyásolhatja.

A **kúszás** (drift) is egy fontos paraméter, amely néhány speciális technológiára jellemző. A kúszás a követőeszköz hibájának folyamatos növekedése az időben rögzített objektum esetében. Szemben a remegéssel, amely egy fix pont körül statisztikai hibával terhelt értéket eredményez, mialatt a várható értéke állandó, a kúszás esetén éppen a várható érték az, ami folyamatosan változik (statisztikai szórása nincsen – hacsak remegéssel nem párosul). Kúszással terhelt méréseket (amennyiben abszolút mérésre van szükség) folyamatosan kalibrálni szükséges egy kúszásmentes követőtechnológia segítségével, vagyis ilyen esetben általában valamilyen hibrid megoldást alkalmazunk. Ez ugyan úgy tűnik, mintha értelmét vesztené, fontos azonban tudni, hogy ezek a megoldások általában jelentősen nagyobb mintavétellel biztosítanak eredményt.

A **késleltetés** (latency) a tárgy pozíciójának és orientációjának megváltozása és az érzékelő észlelése között eltelt idő. Ezt az értéket is fontos, hogy alacsonyan tartsuk, különösen fejre szerelhető követők esetén. Sokszor predikciós megoldást is alkalmaznunk kell, hogy a késleltetést a kívánt szinten tartsuk. Ha a szemünkbe érkező látvány 50-60 ms-nál nagyobb mértékű késleltetéssel érkezik meg, a szimulációs betegség tünetei (fejfájás, émelygés, hányinger, szédülés stb.) igen gyorsan megjelenhetnek. A késleltetés főbb összetevői:

- a pozícióváltozás mérésének ideje (eszköz),
- az eszköz és az elektronika, ill. számítógép közötti kommunikáció miatti késleltetés,
- a kép renderelésének, összeállításának ideje.

Sok esetben a mérés, a kommunikáció, a renderelés és a megjelenítés aszinkron módon működnek más-más sebességgel, ami jelentősen növelheti az összkésleltetést. Hatékonyabb, ha a megjelenítőrendszerhez van szinkronizálva az összes összetevő (erre a célra nagyon jól használható a generator lock/genlock). A rendszer késleltetése ezáltal alacsonyabb lesz, mivel a csővezetékre épülő architektúra minden összetevője mindig épp időben kapja meg az előző komponenstől az adatokat. A késleltetés kézbentartása érdekében fontos a megfelelő kommunikációs csatorna kiválasztása, illetve a renderelés esetén is hasznos a LOD-modell (Level of Detail) alkalmazása, hogy mindig csak éppen olyan minőségű grafika jelenjen meg, amelynek renderelése a rendelkezésre álló időszeletbe belefér.

Követőeszköz **frissítési gyakorisága** (refresh rate) megadja a másodpercenkénti mérések számát (követőeszközök esetén tipikusan 30-150 mérés másodpercenként). Számos esetben ez olyan alacsony, hogy befolyásolja a rendszer többi paraméterét, mivel nem keletkezik mérési eredmény megfelelő időközönként. Amennyiben a száma

magas, a késleltetés csökkentése érdekében alkalmazott predikció hatásfoka is sokkal jobb. Ha az értéke jelentősen magasabb, mint ami a rendszer számára szükséges, nem feltétlenül szükséges a rendszerhez szinkronizálni (sok esetben nehézkes). Amennyiben a jelfeldolgozó egység az eszköztől lekérdezéses üzemmódban kapja meg az adatokat, a frissítési gyakoriság csökken, ezért sok esetben célszerűbb a streaming üzemmód (folyamatos adás) beállítása. Ha egy eszköz több mozgó objektumot is figyel, a frissítés gyakorisága legtöbb esetben arányosan csökken.

4.1.2 Optikai követők

Manapság az egyik leggyakrabban alkalmazott fizikai elv a követők terén az optikai méréseken alapuló módszerek. Valójában ez számos különféle eljárást takar, nem is célszerű őket egy helyen tárgyalni. Az eljárásoknak két fő iránya van, az egyik a kamera-, illetve vonalkamera-alapú módszerek, a másik irány egyszerű fotodiódákra épít, ahol a fotodiódák és a fényforrások megfelelő térbeli elrendezése által kapunk megfelelő pozíciót és orientációt.

A kameraalapú rendszerek nem igényelnek különleges eszközöket, a lényegi feladat elsődlegesen szoftveres algoritmusokban rejlik, amellyel külön kismonográfia foglalkozik, így itt ezekre nem térünk ki. Amit fontos itt megjegyeznünk, hogy a kameraalapú megoldások robusztussága sok esetben alacsonyabb az elvártnál (természetesen olyan esetekben, ha speciális körülményeket teremthetünk, a robusztusság nagymértékben növelhető), ráadásul sokszor az ilyen megoldások késleltetése is nagyon magas, ezért jelenleg virtuálisvalóság-környezetekben egyszerű követési feladatra ritkán használjuk. A számítógépes látás eszköztárát elsődlegesen olyan feladatok megoldására célszerű használni, amelyet más méréstechnológiára épülő eszközzel nem, vagy rendkívül körülményesen, tudunk használni.

A fotodiódákra épülő megoldások általában azon alapszanak, hogy a követőeszközön található számos érzékelő több külső fényforrást időmultiplexált módon alkalmazva próbál feldolgozni. A feldolgozás többféle is lehetséges: figyelembe lehet venni, hogy a dióda rálát-e a sugárzóra, ha igen, változik-e a fényerő, egyes megoldásokban az adó modulált jele és a vett modulált jel közötti fáziseltérés is hasznos információ lehet, ill. a méréstechnika pontosságának köszönhetően már time-of-flight megoldások (1 cm-t a fény 33 pikoszekundum alatt tesz meg!) is szóba jönnek.

Az eljárások többnyire triangulációra épülnek, mivel a legegyszerűbb annak megmérése, hogy az egyes adók egymáshoz képest milyen szöget zárnak be, ezekből pedig számítható a pozíció.

A fenti eljárások mellett *kívülről befele néző* megoldások is vannak. Ilyenkor a fényforrások a követni kívánt eszközön találhatók és az érzékelők a rögzített állomáson helyezkednek el. Ennek a módszernek előnye, hogy gyorsabb és biztosabb az adatátvitel, kisebb a késleltetés, ugyanakkor körülményes a több eszköz együttes megfigyelése, ezért inkább olyan környezetekben alkalmazzák, ahol biztosan nem lesz később sem több követendő eszköz a rendszerben.

A kutatóműhelyekben és a kereskedelmi forgalomban is számos további eljárás létezik még. Egyes megoldások kétirányú lézereltérítő jeleit feldolgozva határozzák meg a követendő objektum paramétereit, más megoldásokban egy teljes mennyezet van felszerelve kétdimenziós ledtömbbel és annak érzékelése határozza meg a pozíciót és az orientációt. Az összes elérhető technológia részletezése nem fér bele a dokumentum kereteibe.

Az optikai alapú módszerek hátránya, hogy minden időpillanatban közvetlen rálátás szükséges az adók és a vevők között. Más szempontokból viszont az egyik legjobb választás lehet (igaz, ez azért sok esetben korlátozó erejű lehet).

A módszer előnyei közé tartozik, hogy az optikai tulajdonságokat leszámítva más környezeti tényezők nem igazán befolyásolják a működést, így pl. nem érzékeny a közelben található fémtárgyakra (l. elektromágneses követők). A frissítési frekvencia is viszonylag magas lehet, illetve általában a késleltetés is alacsony. További előny, hogy nagy távolságok esetén is működhet, ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a triangulációra épülő megoldások esetén a távolság növekedésével a pontosság (és a felbontás) csökken.

4.1.3 Elektromágneses követők

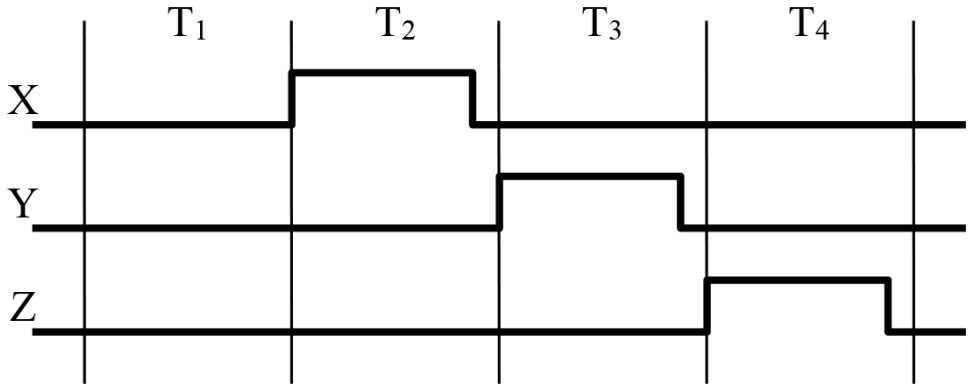
Az elektromágneses követők alapvető működése [Burdea–Coiffet 2003] [Maclachlan et al. 2016], hogy egy sugárzó háromirányú mágneses teret állít elő és a vevő szintén három irányban méri a mágneses teret mindhárom sugárzott mágneses tér tekintetében, és az így kapott 9 értékből komplex matematikai és kalibrációs rendszer segítségével számítja a pozíció és az orientáció hat értékét.

A sugárzó tipikusan egy nagyobb méretű ferromágneses kocka, amelyre három antenna egymásra merőleges tekerccsel van ellátva, ezáltal három ortogonális elektromágneses teret lehet létrehozni.

Az elektromágneses követőknek két tipikus megvalósítási módja van. Az úgynevezett **AC mágneses követők** esetében a három tekercsen három különböző frekvenciájú váltakozó tér jön létre, amelyet a sugárzóhoz hasonló szerkezetű, csak jelentősen kisebb ferromágneses kockára ortogonálisan tekercselt tekercs érzékel. Az érzékelő a három mágneses teret jól el tudja különíteni egymástól, mindhárom tekercsen mérni tudja az adott irányba terjedő elektromágneses hullám amplitúdóját.

Az AC-követők esetében a közeli fémtárgyak komoly torzítást okozhatnak az elektromágneses térben. A váltakozó mágneses tér hatására ugyanis a fémtárgyakban örvényáram keletkezik, amely újabb mágneses teret kelt, ezáltal torzítva az eredeti teret. A mennyezetben található vasgerendák is ilyen torzító tényezők.

A **DC mágneses követők** esetében a sugárzó impulzusos mágneses teret állít elő, amelyet a vevő oldalon tipikusan magnetométerrel vagy Hall-szenzorral érzékelnek. Az impulzusos teret a három tekercs felváltva sugározza olyan módon, hogy 4 fázisból az első fázisban egyáltalán nem sugároz, amikor a vevők a környezet mágneses terét mérhetik, ezáltal kompenzálva az impulzusválaszra kapott eredményeket.



4.1. ábra: A DC mágneses követők működése
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

Y

A 9 adat alapján mindkét eljárás 3 elmozdulás- és 3 elfordulásértéket határoz meg. A sugárzótól vett távolsággal a mágneses tér fordítottan arányos, ezáltal a vevőben generált áram is. Az elfordulás is hasonló hatású, de az összefüggés összetettebb.

Az elektromágneses követők legnagyobb előnye az optikaival összemérhető pontosság mellett, hogy nem szükséges az adó és a vevő közötti optikai kapcsolat, ami olyan helyeken is alkalmazhatóvá teszi, ahol az optikai megoldások emiatt nem jöhetnek szóba. A hátránya leginkább a környezetben található fémtárgyak okozta torzítások, illetve egyes berendezések elektromágneses sugárzása is gondot okozhat. A késleltetés és a remegés is az eljárás gyengeségei közé tartoznak.

4.1.4 Inerciális és hibrid követők

Az előző két szakaszban ismertetett megoldások frissítési frekvenciája sok esetben nem elegendő a megfelelő látvány előállításához vagy egy objektum pontos pályájának meghatározásához. Amennyiben predikciót is szeretnénk a rendszerünkbe, kifejezetten nagy frissítési frekvenciára van szükség.

Az inerciális érzékelők (giroszkóp és gyorsulásérzékelő) segítségével sokkal nagyobb frissítés érhető el. Egy inerciális mérőegységben (IMU, Inertial Measurement Unit) három ortogonális giroszkóp és három, szintén ortogonális, gyorsulásmérő található, de az abszolút orientáció meghatározása érdekében ma már többnyire mágneses érzékelő is található.

A giroszkóp segítségével az objektum szögsebességét határozhatjuk meg. Korábban a szögsebességmérés perdületmegmaradáson (~tehetetlenség, inertia) alapuló technológiával, ma már inkább optika elven (a fény által megtett úthossz változása) működik. A szögsebesség integrálásával megkaphatjuk az orientációt, fontos azonban megjegyezni, hogy az integrálás kumulált hibát eredményez, vagyis ez a méréstechnika kúszást okoz a számított végeredményben.

Alapvetően problémát jelent, hogy az érzékelők egymástól függetlenül működnek, ezért a három tengely orientációját (forgatás, billentés, csavarás – roll, pitch, yaw) egymástól függetlenül határozzuk meg. A három forgatási irány azonban nem független egymástól, nem mindegy, hogy először forgatunk és utána billentünk, vagy fordítva, ezért önmagában a két értékből nem határozható meg az objektum orientációja. Ahhoz, hogy azt pontosan meghatározzuk, minden időpillanatban ismernünk kell mindhárom orientációs értéket és együttesen kell elvégeznünk az integrálást, vagyis a frissítési frekvencia rendkívül kritikus lehet.

A gyorsulásmérő által létrehozott információ kétszeres integráljával kaphatjuk meg a megtett úthosszt (természetesen előtte a gravitáció által generált addicionális gyorsulási értéket korrigálni kell), ráadásul a giroszkóp kúszással terhelt orientációadatát is figyelembe kell venni, hogy a pozíciót meghatározzuk. Ennek következtében a pozícióhiba kúszásértéke még az orientációt is meghaladja.

A mai IMU-rendszerekben általában egy háromtengelyű mágneses érzékelő (tipikusan szilárdtest-magnetorméter) is található, amely segítségével meghatározhatjuk a mágneses északpontot. A gyorsulásérzékelő jeleinek átlagolásával a gravitáció iránya is meghatározható, így a két abszolút iránnyal a giroszkóp kumulatív hibája folyamatosan korrigálható, az orientációmérés kúszáshibája kézben tartható. A 9 értékből számítható orientációt szenzorfúziós megoldással határozzák meg, amelyre sok esetben Kálmán-szűrőt alkalmaznak, de egyre inkább terjed egy korszerűbb szenzorfúziós eljárás, a Madgwick-algoritmus, amely kifejezetten erre a problémára lett kialakítva [Madgwick et al. 2011]. T3

Mivel a pozíciómeghatározás esetén ilyen lehetőségünk nincs és az orientáció is csak hosszú távon tekinthető kúszásmentesnek (az időközbeni hibák a pozíciómeghatározásban kúszáshoz vezetnek), abszolút pozíciómeghatározásra az inerciális mérőrendszerek önmagukban nem alkalmasak. Természetesen számos olyan alkalmazás van, ahol erre nincs is szükség, és a relatív meghatározás elegendő (a visszacsatolást a felhasználó saját érzékszerveivel oldja meg – hasonlóan a hagyományos egérhez), ahol ez a méréstechnika tökéletes alternatívát jelent.

Amennyiben mégis abszolút koordináták meghatározására van szükség, az inerciális mérést ki kell egészíteni abszolút mérési megoldással, amely ugyan feltehetőleg jelentősen lassabb, de az inerciális mérés eredményét időről időre kalibrálva összességében egy gyors és pontos megoldást kapunk. Az ilyen hibrid követők esetében általában valamilyen szenzorfúziós megoldást alkalmaznak, tipikusan Kálmán-szűrőt.

Az inerciális érzékelőknek számos előnye van. A korábban már említett nagy frissítési frekvencia mellett további előny, hogy belső szenzorok, nincsen szükség külső forrásra, érzékelőre, ezért egyszerűbbek, korlátlan területen használhatók és nincs rálátási probléma. Az is fontos előny, hogy a környezet kevéssé befolyásolja, egyedül az állandó mágneses tér korlátozhatja a mágneses érzékelő működését. Az inerciális érzékelők könnyen megvalósíthatók integrált áramkörökben (MEMS, Microelectromechanical Systems), amelyek ma már viszonylag olcsók – ezért is találhatók meg minden mobiltelefonban. A remegés mértéke is alacsony, amit az integrálás tovább csökkent.

Az egyetlen hátrány a már korábban említett gyorsan kumulálódó hiba, ami a professzionális eszközök esetén is 0,2 mm/s (a kereskedelemben kapható termékek akár 20 mm/s), ami abszolút koordináták meghatározására önmagában alkalmatlanná teszi.

4.1.5 Mechanikus követők

Virtuálisvalóság-környezetekben jelenleg elsődlegesen az előző három szakaszban ismertetett technológiákra épülő eszközöket alkalmazunk, de számos más technológia is megjelenik úgy a kutatóműhelyekben, mint kereskedelmi forgalomban, ezért röviden ezekről is ejtünk pár szót.

A mechanikus követők (sorosan vagy párhuzamosan kapcsolt kinematikai szerkezet, ahol a szegmensek közötti kapcsolatot szenzorral ellátott csuklók jelentik) arra épülnek, hogy ismert hosszúságú szegmensek vannak összekötve csuklókkal, amelyekben szögszenzorok biztosítják azt az információt, hogy a szegmensek milyen szöget zárnak be egymással. A szegmenshosszak és a szögek alapján direkt kinematikai modell segítségével könnyedén meghatározható, hogy az ismert rögzített alaphoz képest hol helyezkednek el az egyes szegmensek végei, illetve milyen irányba mutatnak, így teljes abszolút pozíciót és orientációt kaphatunk, a maximálisan szükséges hat szabadsági fok objektumonként meghatározható.

Előnyük közé tartozik, hogy a többi követőhöz képest egyszerűbb, könnyebb használni, pontosságuk állandó a munkatérben (csak a csuklószenzoroktól függ), illetve nem zavarják az elektromágneses (pl. fény-) vagy egyéb hullámok, terek. A paraméterek tekintetében alacsony remegés és kis késleltetés jellemzi. További előnyük, hogy könnyedén illeszthető hozzájuk erővisszacsatolt megoldás, amely modellezés során jó hatásfokkal használható ki.

Hátrányuk azonban a kis munkatér (mechanikus kar mérete), illetve szintén súlyos probléma a súly, amelynek köszönhetően a felhasználó hamar elfáradhat és az immerzió hatása könnyen lecsökken. Nagyobb szegmensek esetében a súly mellett mechanikai

oszcilláció is felléphet. Szintén gondot jelent, hogy a mechanikai szegmensek korlátozzák a mozgást.

4.1.6 Ultrahangalapú követők

Az utolsó – manapság egyre ritkábban alkalmazott – megoldás az **ultrahangalapú követők**. Az elve talán az elektromágneses követőkhöz hasonlít leginkább, ugyanis három ultrahangadó sugároz három eltérő frekvencián, amelyet három érzékelő érzékel és a kilenc adat alapján határozza meg a vevő pozícióját és orientációját. A három adó és a három vevő háromszög alakban helyezkedik el, az adón a sugárzók nagyobb távolságra helyezkednek el egymástól (tipikusan 30 cm-re), a vevőn pár cm az ultrahangérzékelők közötti távolság. A számítások time-of-flight módszerre és triangulációra épülnek.

Tekintettel arra, hogy az adó és a vevő között bezárt szög, illetve az adó és a vevő közötti távolság kritikus lehet, fejre szerelt követő esetén a sugárzót minden esetben a fej fölé helyezzük, ami ezeket problémákat jórészt kiküszöböli (térben általában csak vízszintes síkban mozgunk, illetve nem fordítjuk el jelentős mértékben laterális irányban a fejünket). Amennyiben nagyobb térben szeretnénk műveleteket végezni, több adót is elhelyezhetünk a fej felett, amelyet a felhasználó mozgásától függően vezérlünk, minden időpillanatban csak egyet bekapcsolva (az adók ilyen esetben alapvetően átfednek).

Mivel ez a megoldás nagyon olcsó, egy időben divatos volt, több gyártó is készített erre a technológiára épülő 3D-s egeret, illetve fejre szerelhető követőeszközt. A gyenge paraméterei miatt és a többi technológia árának csökkenése következtében e technológia alkalmazása megszűnőben van.

A megoldás legnagyobb hátránya, hogy csak kis távolságon használható (kb. 1,5 m), ami ráadásul a páratartalom növekedésével erőteljesen romlik. Itt, amellett, hogy az eleve alacsony pontosság tovább romolhat, olyan problémák is felmerülhetnek, hogy a követés nem működik, vagy olyan értékek jelennek meg az eszköz kimenetén, amik távol állnak a valós értékektől. Az optikai követőkhöz hasonlóan folyamatos rálátásra van szükség, illetve az adó és a vevő között bezárt szögre is nagyon érzékeny a rendszer (egy-egy rosszabb fej- vagy kézmozdulat a követés megszűnését vonja magával). A hatékonyságát a szoba háttérzaja (pl. bizonyos biztonsági berendezések) is rontja.

A megoldás egyetlen igazi előnye a többi megoldáshoz képesti jelentős árkülönbség, de ez az előny az utóbbi időben egyre inkább csökken.

4.2 Navigációs megoldások

Az előző szakaszban azzal foglalkoztunk, hogy milyen módon tudjuk egy valós objektum pozícióját és orientációját meghatározni. Ez az alfejezet részben ennek virtuális térben történő alkalmazásáról, illetve arról szól, hogy a virtuális térben való mozgásra milyen további lehetőségeink vannak.

A navigációs és manipulációs környezet a virtuális környezet megjelenítésének interaktív megváltoztatására és vizsgálatára szolgáló eszköz a kívánt virtuális tárgyak kiválasztása és manipulációja által. Valójában a virtuális térben való navigáció nem sokban különbözik a virtuális objektumok mozgatásától. Legegyszerűbb a virtuális térben való mozgást úgy megközelíteni, hogy a virtuális térben elhelyezett kamerát mint objektumot mozgatjuk. Innentől kezdve nem különböztetjük meg az objektumok mozgatását és a virtuális térben való navigációt, bár egyes eszközök kifejezetten csak egyik célra kerültek kialakításra (elsődlegesen a navigációra, pl. emberi lépésekre épülő navigáció).

A manipuláció során egyik legfontosabb annak eldöntése, hogy abszolút vagy relatív koordinátákra van szükségünk. Amennyiben a teljesen immerzív virtuális térben szeretnénk megfogni egy objektumot, ahol az objektum és a kéz látványa összekapcsolódik, elengedhetetlen a nagyon pontos abszolút pozíció és orientáció meghatározása. Egy lazán csatolt rendszer esetén, ahol az objektum látványa nem kapcsolódik a kézhez (hasonlóan a hagyományos egérkurzor sem kapcsolódik a kézhez), a relatív manipuláció is tökéletes megoldás lehet. Ez utóbbi esetben az aktiváláskor (pl. kéz ökölbe szorítása) kötődik hozzá a virtuális objektum a követőeszközhöz, aktív állapotban vele együtt mozog, deaktiváláskor (pl. kéz kinyitása) a virtuális objektum a virtuális térhez rögzítődik.

Az abszolút pozicionálás nagy hátránya, hogy nagy térre van szükség, ami a tér nagyításával valamilyen szinten orvosolható, ugyanakkor ez felnagyítja követőeszköz remegését, nehezítve a megfelelő koordinációt.

4.2.1 Az objektummanipuláció modellje

Az objektumok mozgásának leírására nagyon jó lehetőséget ad a kinematikai modell. A modell nem ad megoldást az objektumok dinamikus viselkedésére (tipikusan erők által generált mozgás), de az objektummanipuláció szempontjából ez nem szükséges.

A modellben a mozgás alapvetően homogén transzformációk segítségével írható le (minden koordinátavektort kiegészítünk egy elemmel, amelynek értéke 1). Feltételezzük, hogy a térben található egy pont, amelynek koordinátái rendre x, y és z, akkor az alábbi homogén transzformációkat végezhetjük el:

Forgatás x tengely körül: $$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Eltolás: $$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Az egymás után elvégzett műveleteket az egyes transzformációs mátrixok összeszorzásával kaphatjuk meg. Amennyiben egy $\mathbf{T_R}$ transzformációs mátrixszal jellemzett forgatás után végzünk egy $\mathbf{T_T}$ transzformációs mátrixszal jellemzett eltolást, az eredő transzformációval kapott **T** mátrix értéke: $\mathbf{T = T_T \cdot T_R}$.

A kinematika alapjait Denavit és Hartenberg fektették le:

$$\mathbf{T}_{A\leftarrow B}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3\times3}(t) & \mathbf{P}_{3\times1}(t) \\ \mathbf{0}_{3\times3} & 1 \end{bmatrix}.$$

Ahol a transzformáció a B koordináta-rendszerben leírt pontokat megadja A koordináta-rendszer szerint, ahol A és B ortonormális koordináta-rendszerek (). A transzformáció további előnye, hogy könnyen invertálható (inverz kinematika), amit sok helyen felhasználnak (pl. követőeszközök):

$$\mathbf{T}_{B\leftarrow A} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T\mathbf{P} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}.$$

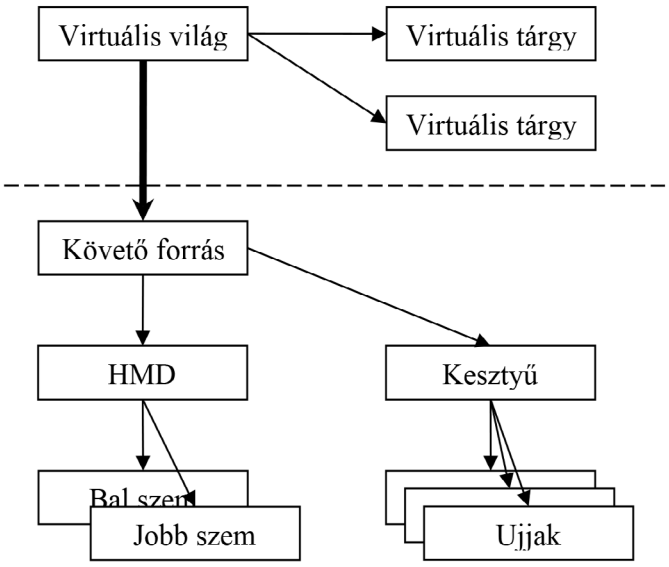
Objektumok mozgatásakor minden objektumhoz rendelünk egy saját koordináta-rendszert (pl. tömegközéppont vagy más jellemző pont alapján). Mozgáskor ez a koordináta-rendszer mozdul el a világkoordináta-rendszerhez (mint „szülőhöz") képest. Ennek a módszernek előnye, hogy nem kell vertexenként (objektum csúcspontjai) számolnunk a mozgást [Burdea–Coiffet 2003].

Ha egy objektum a világkoordináta-rendszerben egy helyben van, az objektum világkoordináta-rendszerben az alábbi transzformációval írható le:

$$\mathbf{T}_{w\leftarrow o} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{w\leftarrow o} & \mathbf{j}_{w\leftarrow o} & \mathbf{k}_{w\leftarrow o} & \mathbf{P}_{w\leftarrow o} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

ahol i, j, k az egyes tengelyeknek a viszonyított koordináta-rendszerben való leírása, és P a koordináta-rendszerek közti eltolás vektora. Amennyiben az objektum mozog, ez a transzformáció időfüggő:

$$\mathbf{T}_{w\leftarrow o}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{w\leftarrow o}(t) & \mathbf{j}_{w\leftarrow o}(t) & \mathbf{k}_{w\leftarrow o}(t) & \mathbf{P}_{w\leftarrow o}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



4.2. ábra: Egy tipikus virtuálisvalóság-szcenárió koordinátarendszer-kapcsolatai (Forrás: a szerző által készített ábra.)

Amennyiben adott a 4.2. ábrán található hierarchikus felépítésű megoldás (koordinátarendszer-kapcsolatok ábrázolva), egy objektum megfogása és elmozdítása az alábbi módon végezhető el. Az objektum mielőtt megfogjuk:

$$\mathbf{T}_{w\leftarrow o}(t) = \mathbf{T}_{w\leftarrow o}\,,$$

vagyis nem történik mozgás. A virtuális objektum helyzete a rendszerben található virtuálisvalóság-kesztyű koordináta-rendszerében az alábbi módon határozható meg:

$$\mathbf{T}_{glove\leftarrow o}(t) = \mathbf{T}_{glove\leftarrow w}(t)\mathbf{T}_{w\leftarrow o} = \left(\mathbf{T}_{w\leftarrow source}\mathbf{T}_{source\leftarrow glove}(t)\right)^{-1}\mathbf{T}_{w\leftarrow o}\,.$$

Ahol a virtuális világkoordináta-rendszer és a valós forráskoordináta-rendszer között a transzformáció (a virtuális és a valós tér közötti kapcsolat) állandó, előre kalibrálandó, illetve nem csak eltolást és elforgatást, hanem skálázást is tartalmazhat. Amennyiben az objektum a kesztyű közelében van, megfoghatjuk. Ekkor az objektum a kesztyű koordináta-rendszeréhez kötődik, vagyis ahhoz képest nincs időfüggése:

$$\mathbf{T}_{glove\leftarrow o}(t) = \mathbf{T}_{glove\leftarrow o}\ .$$

Ezért a transzformációs mátrixot könnyedén számolhatjuk:

$$\mathbf{T}_{w\leftarrow o}(t) = \mathbf{T}_{w\leftarrow source}\mathbf{T}_{source\leftarrow glove}(t)\mathbf{T}_{glove\leftarrow o}\ .$$

Amennyiben ismert minden időpillanatban, hogy az objektum milyen transzformációval vihető át a világkoordináta-rendszerbe, akkor ez renderelés során minden vertexre egy egyszerű mátrixszorzássá egyszerűsödik, ami kifejezetten olyan művelet, amire a GPU-k hardveresen fel vannak készítve.

4.2.2 Navigációra és manipulációra alkalmas eszközök

Az alábbiakban a manipuláció és a navigáció sokszínű eszköztárával foglalkozunk.

Az eszköztár első csoportja természetesen a követőalapú eszközök. Ezekkel általánosságban részletesen foglalkoztunk a4.1 alfejezetben. Az utóbbi évek virtuálisvalóság-rendszerek területen történő jelentős fejlődésének köszönhetően számos változat elérhető kereskedelmi forgalomban. Ezek a **kontrollerek** általában valamely összetettebb rendszerhez kapcsolódnak, amely az egy vagy több kontroller mellett fejre szerelhető megjelenítőeszközt is tartalmaz. Korábban több gyártó is árusított 3D-s egereket, de ezek mára eltűntek, leváltották őket a speciálisan kialakított kontrollerek (pl. HTC VIVE, de számos más termék is elérhető) [Brown 2016].

A 3D-s objektumok manipulációjára, illetve a 3D-s térben történő navigációra nagyon alkalmasak a szintén újabban megjelent 3D-s hanyattegerek (pl. 3DConnexion). Ezek nem igazán hasonlítanak az évtizedekkel ezelőtt alkalmazott görgős hanyattegerekhez. A 3D-s változatokat inkább a joystickokhoz lehetne hasonlítani, de egyrészt már csak alakjuk miatt sem azok, másrészt 6 szabadságfokkal rendelkeznek, minden irányba mozgathatók és minden tengely mentén elfordíthatók. Annak érdekében, hogy felfele is lehessen őket „húzni”, az alaptest súlya viszonylag nagy, hogy ne emelkedjen el a talajtól. Nehézség bennük, hogy a vízszintes mozgatás összekapcsolódik a hasonló irányú forgatásokkal, amihez természetesen gyakorlattal hozzá lehet szokni, de teljesen szeparált mozgatást végezni velük így is nehézkes.

Virtuális térben való mozgásra ugyan nem, tárgyak manipulációjára azonban nagyon jól alkalmazhatók a **6DoF-letapogatók** (pl. a Phantom Premium-sorozat). Ezek eredeti célja valós objektumok letapogatása volt (tized- – vagy akár század- – milliméter pontossággal), de számos egyéb célra is használják, különösen, hogy ma már számos változatot erővisszacsatolással is elláttak.

4.2.3 Barangolás a virtuális térben

Külön szakaszban foglalkozunk azon eszközökkel, amelyek segítségével a felhasználó nem a „kamera manipulációjával” járja be a virtuális teret, hanem saját mozgásával. Amíg a virtuális tér mérete nem haladja meg a valóságban rendelkezésre álló teret, egy

abszolút pozícionálású követőeszköz elegendő. Ha azonban jelentősen nagyobb térben szeretnénk természetes emberi mozgással helyet változtatni, speciális megoldásokhoz szükséges nyúlnunk.

Az összes ilyen jellegű eszköz arra épül, hogy mialatt a felhasználó hagyományos módon lép, valamilyen technikával folyamatosan visszajuttatja a kezdeti pozícióba.

A kereskedelmi forgalomban kapható (kevés) megoldás közül az egyik legelterjedtebb (ha egyáltalán lehet ilyet mondani) a Virtuix Omni omnidirekcionális lépőpad, amely valójában egy sugárirányú hornyokkal ellátott kör alakú, széle felé emelkedő, ívelt lemez, ahol egy speciálisan kialakított, kiálló elemmel ellátott cipővel mozoghatunk. A cipőn elhelyezett elem a barázdákba illeszkedve minden lépés után visszacsúsztatja a felhasználó lábát az alacsony súrlódású lemez közepére. Az elesés ellen egy korlát veszi körbe a felhasználót, amelyhez ő rögzítve is van. A pad teljesen passzív, a középentartást a gravitáció végzi el. Mivel speciális kialakítású cipőre van szükség, ezt egyedileg méretre gyártja a gyártó. Számos mozgást lehetővé tesz: séta, futás, akár hátralépés, vagy egyes esetekben akár ugrás, illetve oldalazás is. A könnyű illesztés érdekében a mozgás billentyűleütésekké alakul, így tetszőleges szoftverrel együtt használható. A többi megoldáshoz képest nem foglal nagy teret.

A másik – inkább professzionális körökben alkalmazott – megoldás a VirtuSphere, ahol a felhasználó egy hatalmas gömb belsejében helyezkedik el, amely felfele fordított kerekeken fordulva mindig úgy áll be, hogy a tömegközéppont lefele mutasson (ez is passzív megoldás). Ezáltal a gömbben mozogva a felhasználó mindig visszajut a kiinduló helyre. Az előző megoldással szemben itt nincs szükség (és lehetőség) a felhasználó rögzítésére, cserébe egy jóval méretesebb és jelentősen magasabb költségű eszköz.

Néhány egyéb megoldás elérhető még kereskedelmi forgalomban, illetve kutatóműhelyekben számos más kísérlet is folyik, ezeknek a jelentősége azonban nagyon alacsony, átlag virtuálisvalóság-felhasználó nem találkozik velük.

Az, hogy ennek a megoldásnak van-e valódi létjogosultsága, egy kicsit megkérdőjelezhető. Természetesen, ha nagyon életszerű virtuálisvalóság-rendszert szeretnénk kialakítani, ahol a felhasználó maximális bemerülésérzettel vesz részt a térben, ez is elengedhetetlen, ugyanakkor nem nagyon indokolt, hogy hasznos felhasználás esetén ilyen mértékű bemerülésérzete legyen a felhasználónak. A kényelmi szempontok előrébb valók, ezért az esetek többségében a felhasználó úgy mozog a virtuális térben, hogy mindeközben a széken ül.

4.3 Gesztusfelismerés

A követőeszközök segítségével könnyedén mozgathatunk tárgyakat és mozoghatunk a virtuális térben. Összetettebb feladatokhoz azonban speciális megoldásokra van szükség. Ha egy virtuális térben szeretnénk objektumokat megfogni, esetleg komplexebb manipulációt végezni rajtuk, a követőeszközök már nem elegendőek.

Ilyen esetekben az a legcélszerűbb, ha az ember természetes mozgására építjük az információbevitelt, nem pedig nehezen megtanulható eszközöket tervezünk. Az emberi gesztusok felismerése ugyanakkor meglehetősen komplex feladat, sok esetben nem is lehetséges kielégítően [Mitra–Acharya 2007].

A gesztusfelismerés elsődlegesen a kézfej és ujjak mozgásának felismerését jelenti [Burdea–Coiffet 2003], ugyanakkor sok esetben a teljes test mozgását vagy az arc mimikáját kell értelmeznünk egy-egy feladat végrehajtásához. Az alábbi szakaszokban ezek megoldásait ismertetjük.

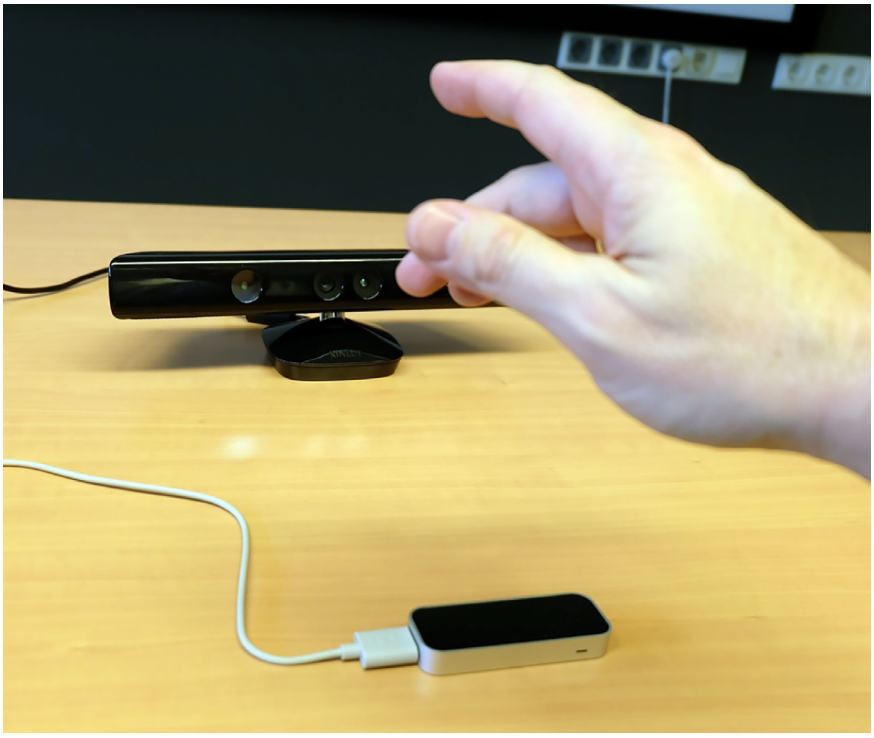
4.3.1 Optikai gesztusfelismerés

Az optikai gesztusfelismerés legismertebb eszköze az eredetileg XBOX-rendszerekhez tervezett Microsoft Kinect [Lun–Zhao 2015], amelyet később kifejezetten Windows-rendszerekhez is gyártottak számítógép vezérlése céljából[2]. Az eszköz alapvetően mélységi képet állít elő, amely segítségével sokkal könnyebb az emberi testrészek szegmentálása, mint egy egyszerű RGB-kamera alapján. A Kinect ráadásul egy RGB-kamerát is tartalmaz, amelyet megfelelő transzformációval szükség esetén a mélységi képre illeszthetünk (mivel a két érzékelő elhelyezkedése között egy offset van, az illesztés nem lesz tökéletes).

A mélységi kamera első változata egy PrimeSense 1080 SoC áramkörre épül (hasonlóan más termékekhez), ahol egy „véletlenszerű” pontok alkotta infravörös tartományú fényforrás visszaverődő értékeit érzékelte egy speciálisan kialakított érzékelő. Az újabb változatokban már egy újabb érzékelő található, amely time-of-flight módszerrel határozza meg a távolságértékeket, ez a megbízhatóságon sokat javított (pl. a napfény kevésbé befolyásolta a működést), de ennek ellenére még sok hiba volt a megoldásban.

Az érzékelő a Kinect verziójától függően 40–400 cm körüli tartományban működött. A mélységi kép alapján az operációs rendszer eszközkezelőjében egy összetett jelfeldolgozó megoldás gondoskodik arról, hogy az alkalmazás már a felhasználó kulcspozícióit kaphassa meg a mélységi kép helyett (szükség esetén az is elérhető), így az alkalmazások közvetlenül követhetik a csukló, könyök stb. pozíciókat, nincs szükség komplex jelfeldolgozásra.

A Kinect mellett számos más mélységi képet generáló megoldás is elérhető, ezeknek jelfeldolgozási eszköztár-támogatása azonban változó mértékű. A Kinect megszűnése miatt várhatóan ezek is javulnak (a fizikai paraméterek már több esetben most is meghaladják a Kinect paramétereit).



4.3. ábra: Kinect és Leap Motion
(Forrás: a szerző felvétele)

[2] 2017 második felében a Microsoft bejelentette, hogy a terméket véglegesen megszünteti.

Egy másik fontos megoldást a **Leap Motion** eszköz biztosít. Az eszköz nem mélységi képet állít elő, hanem két egycsatornás kameraképet, amelyet három mintázat nélküli leddel világít meg és másodpercenként 215 (max. 290) képet juttat be közvetlenül a számítógépbe, ahol a saját eszközkezelője határozza meg az alkalmazások számára az emberi kéz kulcspontjait. A komplex matematikai eljárások nem állítják elő a teljes mélységi képet, kizárólag a kulcspontokra koncentrálnak, amellyel nagy sebességű, valós idejű megoldást kínálnak. A Leap Motion kulcspontpozíció-meghatározása a megadott térrészben 1 mm alatti pontosságú.

A Kinect és a Leap Motion a felhasználás tekintetében is eltérnek, de együttes használatukra is lehetőség van. A Leap Motion felfele néző kivitelű és egy 1 m átmérőjű félgömbben érzékeli az emberi kézfejet, míg a Kinect a felhasználóval szembenéz, a finom mozgásokat kevésbé érzékeli, de a kar (ill. akár az egész test) mozgását jól követi. A két megoldás az eltérő alapelv miatt nem igazán zavarja egymást.

4.3.2 Kesztyűalapú felismerés

Amennyiben nagyon pontos kézgesztus-felismerésre van szükség, illetve az előző szakaszban ismertetett Leap Motion eszköz munkaterénél nagyobb térben szeretnénk működni, az előző megoldások nem igazán jöhetnek szóba. Ilyen esetben valamilyen adatkesztyű használata célszerű, bár ezek költsége jelentősen magasabb az optikai alapú vetélytársainál.

Az adatkesztyűk a felhasználó ujjainak (és sokszor csuklójának) pozícióját, orientációját mérő eszközök. Céljuk a szabadságfok növelése, az emberi mozdulatok, gesztusok teljes kiszolgálása. A felhasználó csuklójának pozícióját általában valamilyen követőeszköz segítségével határozhatjuk meg. Az ujjpercek és a tenyér egyes részeinek a csuklóhoz viszonyított elhelyezkedése speciális méréstechnikai elvekre épül.

Az adatkesztyűket paramétereik és működési elvük alapján csoportosíthatjuk. A megfelelő eszköz kiválasztásánál fontos, hogy előre meghatározzuk, milyen paraméterekre van szükségünk: 1, 2 vagy 3 érzékelő ujjanként; felbontás; mintavételi idő; kesztyűszerű vagy csak néhány ponton rögzül az ujjakhoz; vezetékes vagy vezeték nélküli; szenzor típusa.

Az ilyen kesztyűk kialakításánál fontos, hogy a kéz (egy adott területen belül) teljes szabadságot élvezzen.

Az adatkesztyűk hátrányai közé sorolhatjuk, hogy sok esetben felhasználó-specifikus kalibrációra van szükség, nagy a komplexitásuk (és ezzel együtt a költségük is).

Az adatkesztyűk elsődleges előnye, hogy a robusztussága és a pontossága nagyobb a korábbi megoldásoknál, illetve nagyobb a tér, így jobb navigációt, manipulációt biztosítanak.

Az alábbiakban néhány típust ismertetünk.

Az **üvegszálalapú** megoldások (pl. 5DT Data Glove) arra épülnek, hogy az ujj meghajlításakor az üvegszál is meghajlik, ezáltal nagyobb a visszatérő fény vesztesége. A veszteség mértékéből meghatározható a behajlítottság mértéke. Az érték 10 bites felbontással meghatározható (amire a gyakorlatban nincs szükség, 8 bit minden esetben elegendő). Az eljárás alkalmas addukció/abdukció (ujjak egymástól eltávolítása és közelítése) mérésére is.

A hajlítás mértékének meghatározása **kapacitív** méréssel is lehetséges (pl. DidjiGlove). A hajlításérzékelő egy fésűszerű elektródák között elhelyezkedő dielektrumból áll, a hajlítás során a fésűs elektródák egymáshoz képest elcsúsznak és a kapacitás

mérésével a hajlítás mértéke meghatározható. Az egyszerű méréstechnikai elv miatt nagyon nagy frissítési frekvenciát lehet vele elérni, 10 bites felbontással.

A **lineáris hajlításérzékelőkre** épülő megoldások (pl. CyberGlove) sokkal flexibilisebb megoldást kínálnak, de párhuzamosan a költség is magasabb. A hajlításérzékelő kialakításának köszönhetően a tenyér bármelyik területének hajlítását mérhetjük vele, így pl. a CyberGlove teljes kialakításakor minden ujjperc hajlítása, az egyes ujjak addukciója és abdukciója, a hüvelykujj antepozíciója és retropozíciója (tenyér felé történő behajlítása), illetve maga a tenyér belső hajlítása is mérhető, ezáltal tökéletesen visszaállítva a kézfej állapotát. Gyakorlati haszna azonban virtuálisvalóság-környezetekben elhanyagolható.

Sokkal olcsóbb megoldást kapunk, ha **nyúlásmérésre** épülő (pl. P5-kesztyű) kesztyűt választunk [Davison 2007]. Fontos azonban tudni, hogy a használata nem kényelmes (ha a nyúlásmérő szál elcsúszik a kézfejen, akkor a hajlítást egyáltalán nem méri) és pontatlan is. Ráadásul az ilyen megoldások ujjanként egy érzékelőt tartalmaznak, így komolyabb gesztusérzékelésre nem alkalmasak. Ennek ellenére számos olyan alkalmazás van, ahol sem nagyon pontos értékekre, sem részletes kézalakra nincs szükség, ilyen esetekben ez a megoldás is hasznos lehet.

4.4. ábra: P5 adatkesztyű optikai elven működő bázisállomással (Forrás: a szerző felvétele)

4.4 Elektromos aktivitás alapú eszközök

Az idegrendszerünk (és néhány speciális szervünk) által generált „vezérlőjelek” akciós potenciál formájában terjednek szervezetünkben. Amikor egy sejtben a bejövő inger eléri az ingerküszöböt, az addig nyugalmi potenciálban lévő sejtben (amely -90…-30mV, nagyjából állandó feszültséget jelent) kialakul az akciós potenciál, amely egy impulzusszerű válasz az ingerre. Ez a potenciálváltozás a szomszédos sejtre hatva tovább terjed, végül eljut a megfelelő végpontba. Ez a feszültségváltozás többnyire kijut a bőrfelszínre

is, ami megfelelő eszköz segítségével mérhető. Számos orvosi vizsgálat épül erre a méréstechnikára: Elektrokardiogram (EKG, szívvizsgálatok), elektroenkefalogram (EEG, agyi vizsgálatok), elektromiogram (EMG, izomvizsgálatok) stb.

E jelek méréstechnikája nem igazán bonyolult (bár egyes jelek kiértékelése igen összetett lehet), ezért megjelenhettek a virtuálisvalóság-rendszerekben. Az alábbiakban a fontosabbakról ejtünk pár szót.

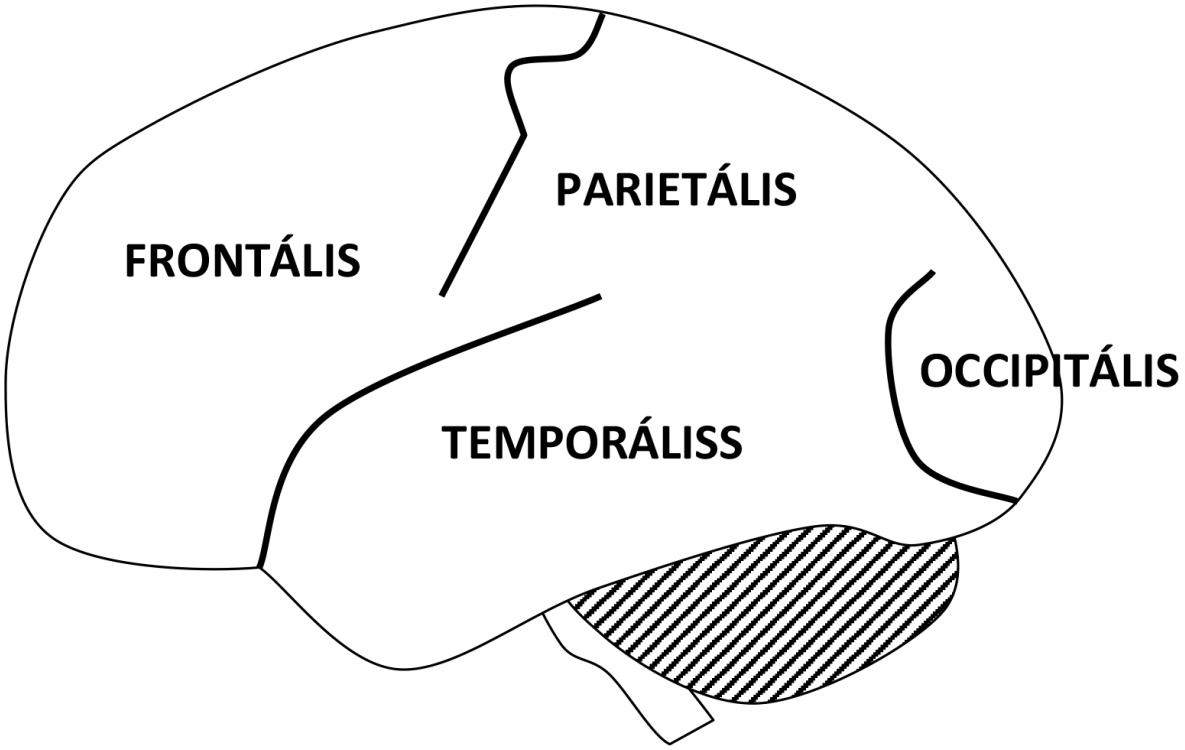
4.4.1 BCI-interfészek

Az egyik fontos elektromosaktivtás-mérésre épülő eszközcsalád a BCI- (Brain Computer Interface) eszközök családja [Bashashati et al. 2007]. A BCI-eszközök valójában EEG-megoldások, de tekintettel arra, hogy csak bizonyos információkra van szükségünk, jóval egyszerűbbek a hagyományos elrendezésű orvosi eszközöknél.

A megoldás alapvetően arra épít, hogy az agyban futó ingerek kijutnak a bőrfelszínre, ezért amennyiben végtelen felbontású EEG-eszközünk lenne, pontosan tudhatnánk, hogy melyik pontról melyik pontra irányul a jelterjedés, amivel elég sok információt kaphatnánk a felhasználó (ill. a páciens) gondolati irányultságáról.

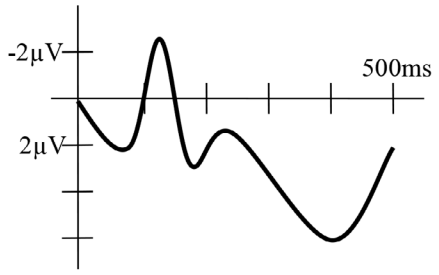
Az emberi agyat öt fő területre oszthatjuk, amelyek eltérő funkciókat látnak el:

- frontális – főként mozgás, kognitív feladatok, érvelés, kifejezés,
- parietális – tapintás-érzékelés, fájdalom,
- temporális – hallás, hang-értelmezés, memória,
- occipitális – látás,
- centrális.



4.5. ábra: Az agy felépítése
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

Amikor az agy valamilyen szenzoros, kognitív vagy motoros eseményt érzékel, erre elektromos válasszal reagál. Ezeket a válaszokat eseményfüggő potenciáloknak (ERP – Event-related potential) nevezzük, amelyek tipikus formája a 4.6. ábrán látható:



4.6. ábra: Eseményfüggő potenciál
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

Az agyi jelek érzékelésére és értékelésére komplex matematikai eljárásokat alkalmaznak (Fourier-transzformáció, Wavelet-transzformáció, állapottérbeli analízisek stb.). Attól még nagyon távol állnak az eljárások, hogy felismerjenek gondolatokat, érzeteket, arra azonban már van lehetőség, hogy valamilyen jellegű hullámformákat elkülönítsenek a többitől és a felhasználó megtanulja előállítani ezeket. Emiatt egy BCI-interfész használatát minden esetben tanulás és gyakorlás előzi meg.

A legtöbb, kereskedelmi forgalomban kapható BCI-eszköz mindösszesen egy elvezetést érzékel (20-20-as elvezetési jelölésrendszerben az FP1 jelű ponton), amely segítségével tipikusan egyetlen mentális állapot érzékelhető („milyen erősen gondolok rá”), de egyes esetekben az agyhullámokat szétválasztva akár komplexebb információátadás is lehetséges.

Az Emotiv cég által forgalmazott BCI-interfész azonban 14 elvezetéssel rendelkezik (20-20-as elvezetési rendszerben az AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4 jelű pontok), amely segítségével bipoláris elvezetések is meghatározhatók (bármelyik két pont között, előre, hátrafutó jelek, Laplace-elvezetések). Köszönhetően az összetettebb feladatnak, ez az eszköz már nem száraz technológia, a megfelelően hatékony működés érdekében speciális anyagra van szükség az elvezetésekhez. Megfelelő használat esetén az eszköz 4 mentális állapotot és 13 tudatos gondolatot képes megkülönböztetni.

4.4.2 Mioelektromos érzékelők

Az elektromos aktivásra épülő eszközök másik csoportja az izomaktivitás-mérésére (EMG, elektromiogram) alapuló gesztusfelismerő megoldások (Pl. Thalmic Labs MYO). Amikor egy akciós potenciál impulzus megjelenik az izmon, amely ennek hatására összerándul [Fatourechi et al. 2007]. Ha egy újabb impulzus érkezik, mielőtt az izom ellazulhatott volna, az izom erőteljesebben összehúzódik. Sorozatos impulzus esetén az izom összehúzódva marad. Minél sűrűbben érkeznek az impulzusok, annál erőteljesebb az összehúzódás (izomgörcs esetén túl sűrűn érkeznek az impulzusok).

Az izomaktivitás mérésekor az impulzusok sűrűségéből következtetni lehet az adott izom összehúzódására, vagyis az érintett szerv relatív orientációjára. Ember–gép-kapcsolat környezetben leginkább az ujjak helyzetére vagyunk kíváncsiak, az ujjakat mozgató izmok pedig az alkaron helyezkednek el. Ez azt jelenti, hogyha mérni tudjuk, hogy

milyen sűrűn érkeznek impulzusok az egyes alkarizmokra, nagyjából meghatározhatjuk az ujjak helyzetét.

Fontos megjegyeznünk, hogy az így meghatározott érték közvetett mérés, izometriás kontrakció (az izom húzódik, de a szerv pozíciója nem változik) esetén is sűrűsödnek az impulzusok, vagyis ha erősebben megszorítunk egy tárgyat, vagy súlyt tartunk, helytelen értéket fog mutatni a mérőeszköz. Amennyiben a kezünkben nincs tárgy, ezen az elven egészen megbízhatóan tudjuk visszaállítani a kézfej gesztusát.

4.5 Képi megjelenítés

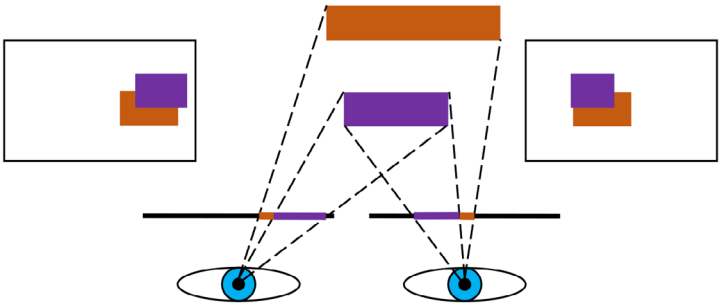
A virtuálisvalóság-rendszerek legfontosabb komponense a háromdimenziós vizuális megjelenítés. Ennek köszönhetően a hardveres és szoftveres eszköztára a legbővebb, legfejlettebb. A szoftveres eszköztár (elsődlegesen számítógépes grafika) olyan komplex mértékű, hogy e kutatóműhelyen belül külön kismonográfia (Korszerű 3D algoritmusok VR alkalmazásokhoz) foglalkozik vele, itt éppen csak annyit foglalkozunk vele, hogy a kapcsolódás egyértelmű legyen. A megjelenítés hardveres eszköztára is meglehetősen kiterjedt, erről részletesebben írunk ebben az alfejezetben.

4.5.1 Az emberi látás

Annak érdekében, hogy lássuk, mire is van szükség a különféle rendszerekben megfelelő háromdimenziós megjelenítés esetén, fontos, hogy nagyjából ismerjük a látás természetét. Olyan rendszer, amelyik teljes mértékben képes az emberi látást kiszolgálni, nem létezik, illetve azon rendszerek, amelyek majdnem tökéletesek, olyan költségűek, ami a felhasználhatóságukat kétségessé teszi. Emiatt sokszor kompromisszumokra kényszerülünk, és jellemzően rendszerfüggő, hogy mi lesz a kompromisszum.

Az egyik legfontosabb kérdés a szemünk felbontása. Egy átlagos emberi szemben 126 millió fotoreceptor található, ráadásul nem egyenletes eloszlásban – a fovea (sárgafolt) közelében sűrűbben, míg távolodva egyre ritkábban helyezkednek el. További különlegesség, hogy míg a fovea közelében inkább a színérzékelő receptorok (csapok) dominálnak, addig a periférián a legtöbb receptor csak fényerőt érzékel (pálcikák), de azt sokkal nagyobb dinamikával. Olyan megjelenítőrendszert készíteni, amely képes ilyen paraméterekkel látványt előállítani (~126 megapixel különleges elrendezésben) jelenleg nem lehetséges. Egy másik megközelítés, hogy a képet közvetlenül a szembe, csak a fovea és annak környékére vetítjük (ún. retinamegjelenítők), de annak megbízható, valós idejű felismerése, hogy pontosan hol van a fovea, még nem kiforrott, illetve az elvéből következően az eljárás veszélyeket hordoz. Emiatt a jelenlegi megjelenítők vagy csak egy kis szögben engedik látni a virtuális valóságot (mintha egy kis ablakon keresztül néznék), vagy a teljes szemünk elé helyezik a látványt, a felbontás azonban alacsony, ami akár szimulációs betegséghez is vezethet.

A mélységi látás élettana is nagyon fontos kérdéskör. A háromdimenziós környezetérzékelés egyik eleme a sztereolátás (két szemünkkel eltérő szögből látjuk ugyanazt a térrészt). Az emberi szem nagyjából 150°-ban lát horizontálisan és 120°-ban vertikálisan. A két szem 120°-ban fed át, ez az a terület, ahol a mélységi látásunk erőteljesebb. A két szem távolsága (IPD, Interpupillary Distance) is egyénfüggő, tipikusan 53–73 mm között változik, amit egy sztereorendszernek figyelembe kell vennie.



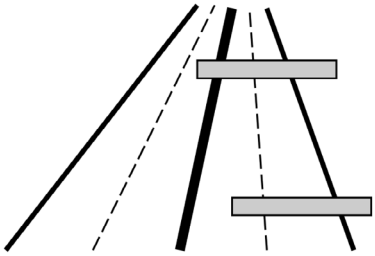
4.7. ábra: Sztereo parallaxis (a bal és jobb szem által látott kép)
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

Kevesen tudják, hogy sok más összetevője is van a térlátásnak. Ráadásul emberfüggő (és környezetfüggő is!), hogy milyen mértékben vesszük figyelembe a két szem által szolgáltatott sztereoinformációt (binokuláris látás). Meglepően sok olyan ember van, aki egyáltalán nem használja a sztereoinformációt a mélységi érzékelésre (sztereovakság)[3].

Az állatvilágban számos olyan faj létezik, amelynek egyáltalán nincs sztereolátása (tipikusan növényevők). Az ember látása is jobb, mint amit az optikai leképzést is beleszámítva, a sztereolátás indokolna (10 m távolságban kb. 5 cm elvi felbontás – a gyakorlatban ennél rosszabb a helyzet). Ennek oka, hogy a sztereo mellett számos más tényező is rendelkezésre áll (monokuláris látás), hogy tudjuk, mi milyen távolságra van. Nagyobb távolságokon a monokuláris látás dominál, illetve akár egyedül is marad, de mozgás esetén is nagy mértékben lecsökken a sztereolátás hatása.

A monokuláris látás elsősorban tanulásra épül. Az ember az évek folyamán megtanulja, hogyha valami valahogyan kinéz, akkor ott milyen mélységek vannak. A következőkben röviden összefoglaljuk a fontosabb monokuláris összetevőket.

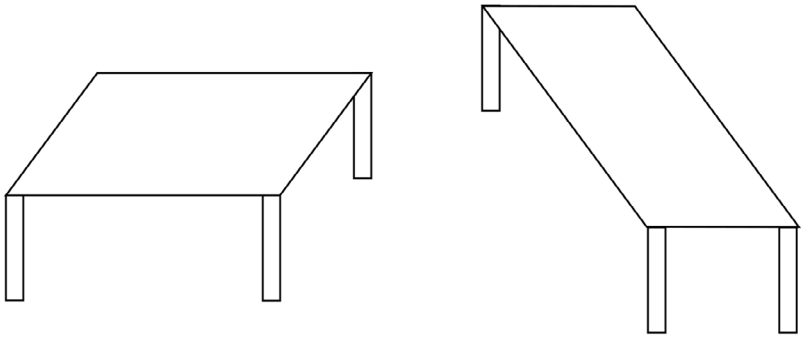
A lineáris perspektíva során minden látványon van egy elvárt méretünk, tapasztalatunkkal kompenzáljuk a látványt. Ha úgy látjuk, hogy hátrébb van, akkor ugyanazt a méretet nagyobbnak érzékeljük (4.8. ábra).



4.8. ábra: Lineáris perspektíva
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

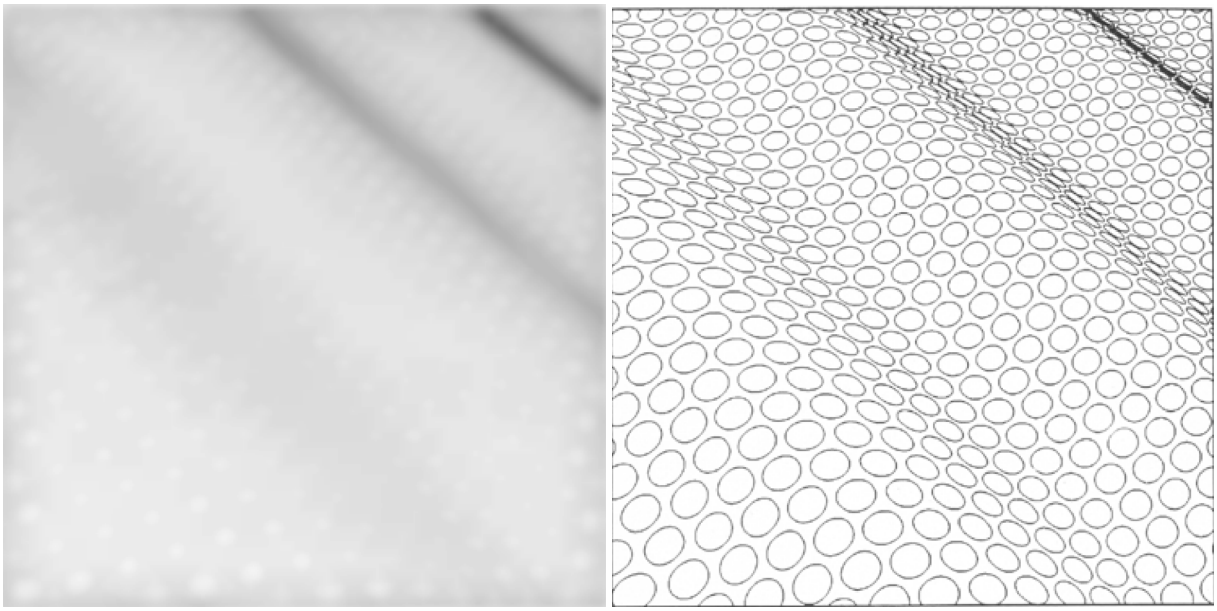
Egy másik tapasztalati kompenzáció az alakzaton múlik. Egy síkba (szemünk síkjára) leképzett objektumhoz egy más dőlésszögű alakzatot képzelünk, amelyet a perspektív torzítás alakított olyanná, amilyennek érzékeljük. A 4.9. ábrán két egybevágó parallelogramma található néhány kiegészítő téglalappal, amelyeknek köszönhetően az emberi agy egy megszokott hétköznapi tárgyra (asztalra) asszociál.

[3] Kutatások kimutatták, hogy a festőművészek között, érezhetően nagyobb arányú a sztereovakság, ők gyakran eleve kétdimenzióban, síkban érzékelik a környezetet.



4.9. ábra: Tapasztalati alakzatkompenzáció
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

További fontos elem a látásban az **árnyékok** és a **kontúrok** (4.10. ábra). Egy általános megvilágítást feltételezve (tipikusan fentről vagy valamelyest oldalról) el tudjuk képzelni az objektum alakját az árnyékok alapján. Ha alulról van valami megvilágítva, akkor az akár teljes mértékben összezavarhatja az emberi agyat. A textúra elemeinek változása is háromdimenziós érzetet kelthet.



4.10. ábra: Árnyék és textúra
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

Nagy távolságokon (több száz méteres távolságoktól felfele) az árnyékok mellett a **légköri torzítások** is segítenek a háromdimenziós érzet kialakulásában.

Minden monokuláris látáshoz kapcsolódó összetevő közül a legerőteljesebb a **mozgásparallaxis**. Ez azt jelenti, hogy amennyiben egy objektumot látunk forogni, vagy a mozgás során térérzet kirajzolódik, esetleg a virtuális kamera mozog a térben, a sztereolátás tulajdonképpen megszűnik és maga a mozgásból eredő látvány veszi át a térlátás szerepét. Ha tesztalanyok elé helyezünk forgó virtuális tárgyakat, nagyon kevesen tudják megkülönböztetni, hogy sztereo- vagy monoszemüveget kaptak. Természetesen az álló tárgyak esetében nem ez a helyzet, ott nagyon jól látszik a különbség. Ennek egy nagyon érdekes következménye, hogy a háromdimenziós akciófilmekben, ahol szinte csak gyors mozgás van, indokolatlan a stereorendezés, nem is beszélve a 3D-s moziban való megtekintésről (a lassú, álló jeleneteknél természetesen érezhető a különbség).

4.5.2 Szemüvegalapú megoldások

A háromdimenziós megjelenítés során legelterjedtebb megoldás, hogy a felhasználó fejére helyezünk valamilyen eszközt, amely segítségével a két szemébe két eltérő kép kerül.

A legegyszerűbb és legolcsóbb megoldás, ha egy hagyományos megjelenítő-rendszert alkalmazunk és úgy választjuk el a képeket, hogy a két szem két különböző színű szűrőn keresztül látja a megjelenítőt, a megjelenítés pedig úgy van kialakítva, hogy minden csatornán csak az adott szembe szánt látvány található. A legismertebb ezen technológiák közül az anaglif megoldás, ahol a bal szembe jut a vörös tartalom és a jobb szembe a kék és a zöld (türkiz színű a szűrő). Az eltérő hullámhosszak miatt a felhasználó dioptriás különbséget lát a két szem között, ami nagyon hamar elfárasztja a szemet, ezért professzionális megoldásokban a vörös lencsén kb. +0,5 dioptria található. Természetesen a látvány minőségén a színszűrés minősége is sokat ronthat.

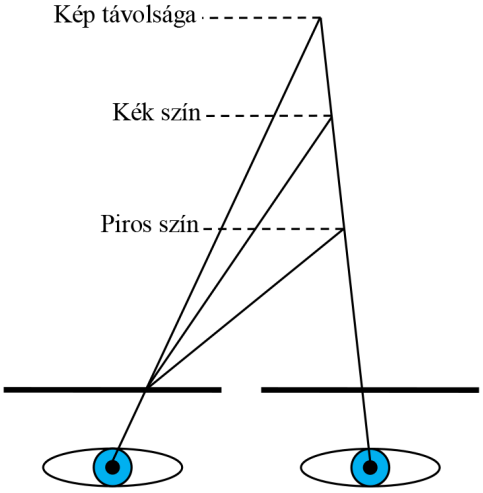
Az anaglif megoldás egyik komoly hátránya, hogy szemüveg nélkül gyakorlatilag élvezhetetlen, ezért sok helyen alternatív megoldást alkalmaznak: az anakróm megoldást. Az anakróm képek esetén a két felvett kép között kisebb a távolság, illetve korrelációs technikával a két képet egymásra csúsztatják, amit később a szem képes korrigálni. A harmadik elem, hogy a türkiz lencsén a vörös egy részét is átengedik, amitől nem csak még jobb lesz a szemüveg nélküli látvány, de a szemüveggel is jobb a színhűség. Összességében az anakróm abban is segít, hogy a szem számára nem lesz annyira zavaró, vibráló a kép.

Egy újabb megoldás a színalapú szétválasztásra a ColorCode 3D (2004-es szabadalom). Ez már nem a vörös–türkiz-tengelyt alkalmazza, hanem borostyánsárga (> 500 nm) szín jut a bal és kék a jobb szembe. Szemben az anaglif és anakróm megoldásokkal, a ColorCode 3D nem egyszerűen szétválasztja a két képet, hanem meghatározott módon juttatja a két szembe a látványt. Egy kép előállításánál az alábbi megoldást alkalmazza minden pixelre (kompozit: $R_c G_c B_c$):

$$R_C = R_L$$
$$G_C = G_L$$
$$B_C = 0{,}15R_R + 0{,}15G_R + 0{,}7B_R.$$

Ennek során alapvetően a bal szem látja inkább a színeket, a jobb szem elsősorban monokróm a mélységi információkhoz. A ColorCode 3D-képek is sokkal jobban élvezhetők szemüveg nélkül, mint az anaglif változatok.

További színalapú megoldás a **ChromaDepth**. Itt már nem a színek szétválasztása képezi az eljárás alapját, hanem speciális prizma segítségével az egyes színeket különböző távolságra vetíti a szemüveg. A piros szín közelebb lesz látható, míg a kék távolabb. A szemüveg mindkét oldala teljesen átlátszó, de a bal oldali lencse megtöri a fényt (4.11. ábra).



4.11. ábra: ChromaDepth szemüveg
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

Ez a megoldás nagyon jól használható háromdimenziós demonstrációra, geometriai, kémiai képletek megjelenítésére, de bemerüléses virtuálisvalóság-rendszer nem igazán építhető rá.

Professzionális rendszerekben az eddigi megoldások nem gyakran kerülnek elő (bár fejlesztés során sokat segítenek), két komolyabb technológia van azonban, amelyek rendszerint előfordulnak virtuálisvalóság-rendszerekben. Mindkettőnél teljes értékű a színmegőrzés és hosszú távon sem okoznak problémát a szervezetnek.

Az egyik a polarizációs elvű megoldás (3D-s mozikban jobbára ilyen található), ahol két projektor segítségével vetítenek ugyanarra a felületre, de mindkét projektoron található egy-egy polarizációs szűrő, amelyek polarizációs iránya egymásra merőleges (lineáris polarizáció esetén) vagy forgásiránya ellentétes (cirkuláris polarizáció esetén). A szemüveg ugyanilyen polarizációs szűrővel van ellátva, amelynek következtében az ellenkező módon polarizált látványból a szemüvegen semmi sem szűrődik át. Mindkét szem csak a számára megfelelő polarizációval ellátott látványt látja. Ehhez nagyon fontos, hogy a visszaverő közeg (vászon) olyan anyagból készüljön, amely nem változtatja meg a polaritás irányát, ezért nem lehet tetszőleges vászont választani. A lineáris polarizáció hátránya, hogy a fej (laterális) elfordításával elkezd átszűrődni a másik szem látványa (nem lesznek merőlegesek a polarizációk), ez azonban a cirkuláris polarizációnál nem fordul elő. Megjegyzendő, hogy cirkuláris polarizáció esetén sem forgathatjuk a fejünket, mivel a sztereolátványnak fontos, hogy egy síkban legyen a két kép, elfordítás esetén viszont ez nem teljesül.

A másik professzionális megoldás az Infitec[4] technológiája. Hasonlóan a polarizációs megoldáshoz, itt is két megjelenítőre (tipikusan projektor) van szükség, amely a két képet teljes színtartományban előállítja (4.12. ábra). A projektoron és a szemüvegen elhelyezett

4 A Dolby felvásárolta, ezért „Dolby 3D” néven is megtalálható, ami nem összekeverendő a „Dolby Surround” kifejezéssel, ami az audiójelekre vonatkozik.

szűrő azonban a polarizáció helyett színalapú, mindkét szűrő átengedi a piros, a kék és a zöld frekvenciának egy részét, de a két szem között frekvenciakülönbség van. A két szembe jutó színek a 4.1. táblázat szerintiek:

Szem	Vörös	Zöld	Kék
Bal	629nm	532nm	446nm
Jobb	615nm	518nm	432nm

4.1. táblázat: Az Infitec által használt színhullámhossz-értékek
(Forrás: http://videotechnology.blogspot.com/2009/06/dolby-3d-digital-cinema.html*)*

Ezek alapján a bal szem látványa enyhén narancssárgább érzetű, mint a jobb. Az Infitec megoldásának előnye, hogy nem szükséges speciális vászon és polarizációban is teljes a kép, összességében jobb fényerőt biztosít (természetesen a színszűrő miatt fényerőveszteség van).

4.12. ábra: Infitec szűrővel ellátott sztereo-projektorrendszer
(Forrás: a szerző felvétele.)

A fentiektől teljesen eltérő megoldás az úgynevezett **aktív shutter-technikára** épülő megoldások, hétköznapi nevén aktív 3D-s szemüvegek.[5] A polarizációs és az Infitec technológiával szemben itt elegendő egyetlen megjelenítő, a két szem számára előállított kép időosztással jön létre. Ehhez egy speciális (aktív) szemüveget kell használni, amely hol az egyik, hol a másik szemet takarja ki szinkronban az előállított képpel. A kitakarás a hagyományos folyadékkristályos megjelenítők elvén működik, csak azzal ellentétben itt egyetlen „pixel” vált világos és sötét között. Mivel a megjelenítővel folyamatos szink-

5 A 3D-s televíziók többsége ezt a megoldást alkalmazza.

ronban kell működnie, a két eszköz között a kapcsolatot folyamatosan biztosítani kell. Bár léteznek vezetékes megoldások is, többnyire valamilyen optikai adatátvitel történik a megjelenítő és a szemüveg között, ezért figyelni kell rá, hogy a kettő között sohase legyen kitakarás (a két eszköz néhány száz milliszekundum rendszerességgel szinkronizálódik). Annak érdekében, hogy a látvány ne vibráljon, a képfrissítési frekvencia többnyire duplája a hagyományos megjelenítőkének. Szemenként legalább 60 Hz képfrissítésre van szükség, az időosztás miatt ez duplázódik. Ráadásul az emberi szem érzékeny a nagyobb frekvenciájú villogásra, vagyis egy 60 Hz-cel működő folyadékkristályos megjelenítő nem okoz gondot (egy állandó pixel nem villog, csak 60 Hz-cel frissül), de a 60 Hz-es frissítésű szemüveg minden félperiódusban kitakarja a látványt (elsötétít), ezért villogás érzékelhető, ami zavaró lehet.

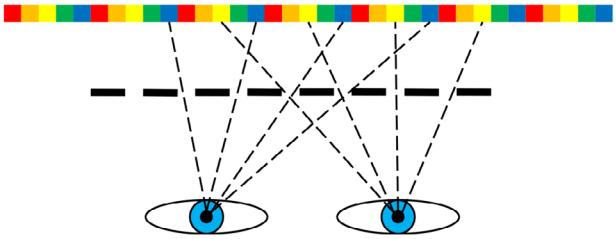
4.5.3 Autosztereoszkóp megjelenítők

Autosztereoszkóp megjelenítők esetén nincs szükség szemüvegre, maga a készülék oldja meg, hogy a két szembe eltérő képet juttasson. Ezek a megoldások általában egy hagyományos folyadékkristályos megjelenítőre épülnek és az egyes pixelekből kijutó fényt irányítják el valamilyen irányba (valójában szubpixeles szinten oldják meg, hogy a felbontásérzet jobb legyen). Az elvéből következik, hogy egy ilyen megoldásnál pontosan kell tudni, hogy hol helyezkedik el a felhasználó (egyetlen felhasználó tudja érdemben használni egyidejűleg), többnyire magát az eszközt készítik úgy el, hogy a felhasználónak előre meg van határozva a helye. Annak érdekében, hogy a felhasználó valamilyen mértékben mozgathassa a fejét és ettől ne essen szét a háromdimenziós látvány, 5–8 irányba szórják szét a pixeleket. Ez azonban azt jelenti, hogy az egy szembe jutó kép felbontása az eredeti képéhez képest ugyanilyen mértékben csökken, jól használható rendszerek esetében ezért nagyon nagy felbontású kijelzőket alkalmaznak.

Az egyik autosztereoszkóp megoldás során **lentikuláris lencséket** alkalmaznak. Ez nem más, mint a képernyőre rögzített, hengerszerű barázdákkal kialakított fólia, ami egyszerű optikai fénytöréssel oldja meg a képrészletek irányítását (4.13. ábra).

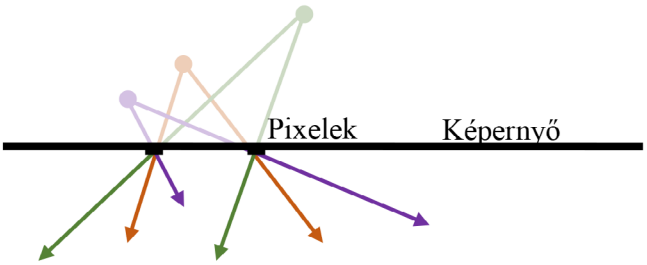
4.13. ábra: Lentikuláris lencse szerkezete
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

A másik gyakori megoldás a **parallax barrier**-technológia (4.14. ábra). Itt az egyes szubpixeleket egy rács takarja ki egy-egy irányba, míg más irányba a más elemeket takarja ki. Parallax barrier-megoldás esetén léteznek aktív változatok, amelyek a felhasználó mozgását követve képesek ezt a rácsot mozgatni, így megfelelő alkalmazás és fejkövetőrendszer segítségével bizonyos mértékben körbejárható a háromdimenziós látvány. Mivel a rács sűrűbb és ritkább nem lehet, a képernyőtől való távolodás és közeledés ebben az esetben sem megoldott.



4.14. ábra: Parallax barrier-megoldás
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

A pixelszétválasztásos technológiák mellett igen költséges technológiaként elérhető ma már olyan eljárás is, ahol maga a megjelenítő képes arra, hogy különféle irányokba eltérő képet vetítsen. A Magyarországi Holografika Kft. által kifejlesztett HoloVíziós technológia a holográfia geometriai elveire épít (4.15. ábra), ugyanakkor csak kulcselemekre koncentrál (a holográfia egy az egyben történő alkalmazása olyan mértékű adatmennyiséget igényelne, ami jelenleg még nem elképzelhető, ugyanakkor semmilyen előnyt nem hordozna). A megjelenítőfelület pixelei (az ő elnevezésükben voxelek – ami félrevezető) maguk képesek számos irányba eltérő színű fényt sugározni, vagyis nincsenek a rétegek közötti eltolódásból adódó korlátok a felhasználók helyzetére, ezért tetszőleges mennyiségű felhasználó nézheti egyidejűleg és teljes mértékben körbejárható (természetesen a függőleges irányra ez nem igaz, de arra a gyakorlatban nincs is szükség).



4.15. ábra: A HoloVízió működési elve
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

4.5.4 Fejre szerelhető megjelenítők (HMD)

Az utóbbi évek talán leginkább fejlődő iránya a fejre szerelhető megjelenítők (HMD, Head Mounted Display). Ezekben az eszközökben a kijelző a felhasználó szeme előtt található, a két szem két különböző (vagy egy kettéosztott) megjelenítő felületet lát.

A mobiltelefonok képernyőinek fejlődésével az emberek többségének rendelkezésére áll egy olyan felbontású megjelenítőeszköz, amelynek kettébontásával is olyan felbontás marad, amellyel egy már valamennyire elfogadható háromdimenziós megjelenítőrendszert kapunk. Ehhez nem kell más, mint egy olyan fejre szerelhető eszköz, amelybe a telefont belehelyezve, egy lencserendszeren keresztül a szemünkbe juttatja a látványt, illetve egy alkalmazás, amely ismerve az egyes szembe jutó pixelek elhelyezkedését, előállítja az osztott képernyőn a háromdimenziós tartalmat. Természetesen professzionális eszközökbe bele van építve a megjelenítő, amely egyrészt többnyire jobb felbontású, másrészt a rögzítés is sokkal pontosabb tud lenni.

A fejre szerelhető megjelenítők másik legfontosabb eleme egy olyan lencserendszer, amely a látott kép érzékelési távolságát eltolja a felhasználótól virtuálisan nagyjából 5 m távolságra. Enélkül a szemünknek pár centiméter távolságra kellene fókuszálnia,

ami önmagában is elég fárasztó, de ha a sztereo parallaxis által nyújtott távolságtól ez jelentősen eltér, akkor az olyan mértékű kognitív disszonanciát okozna, ami miatt teljes mértékben használhatatlan lenne a rendszer. A nagyjából 5 m távolság egy olyan érték, ahova fókuszálva a szemünket ez a disszonancia nem okoz problémákat a gyakorlatban előforduló alkalmazásokban.

A harmadik elem a megfelelő követőrendszer kialakítása. Enélkül ugyan háromdimenziós tartalmak megtekinthetők, virtuálisvalóság-környezetekben azonban fontos a felhasználó fejének követése a megfelelő tartalom előállításához. Ennek a követőnek ráadásul a legtöbb paraméterben nagyon jónak kell lennie, egyéb esetben hamar megjelenhetnek a kiberbetegség tünetei (fejfájás, hányinger stb.). Egyrészt nagyon fontos, hogy mind a hat szabadsági fok elérhető legyen. Sajnos, számos eszköz kapható a piacon, amely csak öt (esetleg csak kettő) szabadsági fokkal rendelkezik. Ha elérhető, akkor a pozíció három szabadságfokú módon kerül meghatározásra. A három forgásirány azonban nem mindig elérhető. A fejbillentés (pitch) és a függőleges tengely körüli elforgatás (yaw) mellett fontos a laterális irányú elfordítás ellenőrzése és alkalmazása is. Annak ellenére, hogy az ember alapvetően nem forgatja ilyen módon a fejét, az apró mozgások miatt disszonanciát és rosszullétet okozhat, ha a rendszer nem támogatja.

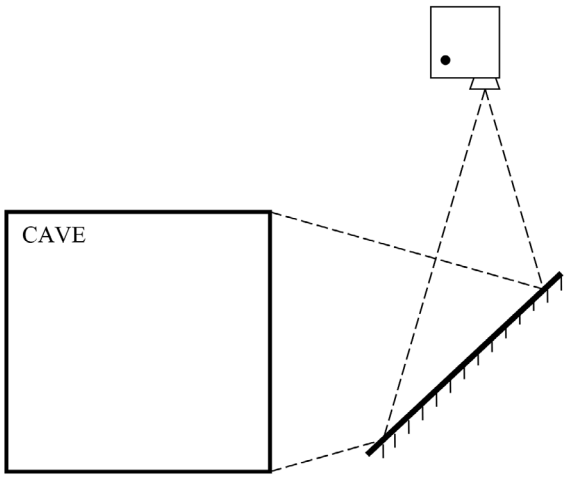
Nagyon fontos továbbá, hogy a követőmegoldás paraméterei jók legyenek. Bármelyik paraméter gyengesége rosszulléthez, hányingerhez vezethet. A késleltetésnek lehetőség szerint 30 ms környékén belül kellene lennie, ha 100 ms-ot eléri, a rendszer gyakorlatilag használhatatlan. A 30 ms sok esetben nem igazán elérhető, mivel maga a renderelés meghaladja ezt és ahhoz hozzáadódik még a pozícióérzékelés és az adatátvitel, ezért sok esetben valamilyen komplex predikciós megoldást alkalmaznak, amelynek értékét, a változás irányát és egyéb paramétereket a friss mérésekkel folytonosan korrigálják.

A másik súlyos probléma a remegés kérdésköre. Amennyiben a remegés túl nagy és ezt a látvány létrehozásánál nem korrigálják, a felhasználó azt látja, hogy folyamatosan remeg a környezet, ami szintén könnyen vezethet gondokhoz.

4.5.5 Nagy méretű megjelenítők

A fejre szerelhető eszközök megjelenítési problémáira megoldást kínál, ha a virtuálisvalóság-alkalmazásban a látványt valamilyen projektoros megoldással állítjuk elő. A háromdimenziós látvány megtartása érdekében vagy polarizációs, vagy infitec, vagy aktív shutter technikát alkalmazunk.

A projektoros megoldásokkal többféle elrendezést is használhatunk. Amennyiben mindössze egy falra vetítünk, azt **WALL**-nak hívjuk, de ha több egymásra merőleges falat is használunk a háromdimenziós tér előállítására, azt **CAVE**-nek nevezzük. A CAVE általában minimum három falat alkalmaz, de sokszor megoldható, hogy a negyedik falra is vetítsünk. Professzionális környezetben a mennyezeten és ritkán a padlón is elő lehet állítani a háromdimenziós teret. Annak érdekében, hogy a felhasználó ne takarja ki a vetítő által sugárzott képet, ha csak lehetséges, a CAVE fala olyan vászon, amelyre a CAVE-en kívülről tudunk vetíteni. A megfelelően torzításmentes vetítéshez vagy nagy távolságra kell helyezni a projektort (erre sok esetben nincs lehetőség), vagy valamilyen tükrös elrendezést kell alkalmaznunk (4.16. ábra).



4.16. ábra: Tipikus vetítési elrendezés a CAVE falára kívülről (felülnézet)
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

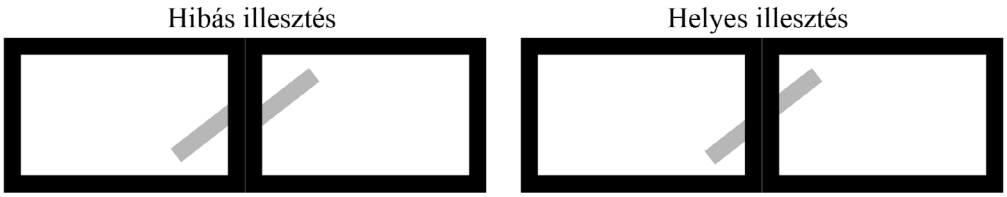
A harmadik gyakori elrendezés a **DOME**, ahol a vetítési felület ívelt, tipikusan valamilyen gömbfelület. Míg a CAVE-elrendezést általában egyszemélyes bemerülési rendszerként szokták alkalmazni, a DOME alkalmas arra, hogy nagy számú felhasználót szolgáljon ki (színházméretű rendszerek is léteznek), illetve olyan egyszemélyes megoldás is létezik, ami pedig jóval kisebb, mint egy CAVE, a gömbfelület átmérője 1 m körüli.

A projektoros megoldások legnagyobb nehézsége a projektorok illesztése. Egyrészt illeszteni kell a pontosan ugyanoda vetítő sztereoprojektorokat (polarizációs vagy infitec), ami a háromdimenziós érzékelés miatt nagyon fontos. Kritikus, hogy egy objektum két szembe jutó képe pontosan ugyanabban a magasságban legyen (lehetőség szerint pixelnyire), hogy ne okozzon zavart a felhasználónak. A vízszintes illesztés egy kicsit kevésbé kritikus, de többpixelnyi eltérés már megváltoztathatja a virtuális objektumok látszólagos helyzetét.

Másik nehézség a külön helyre vetített projektorok összeillesztése. Itt egyrészt probléma, hogy a határra eső objektum teljes mértékben folytatólagos lehessen, illetve a gyakorlatban a projektorok átfednek egymással, ezért a teljes átfedésnek tökéletesnek kell lennie. Ez CAVE esetében is nehézség, ha egy falhoz több projektort is fel kell használni, de a DOME esetében ez kifejezetten bonyolult. Ezt tovább rontja, hogy a környezet rezgései miatt idővel elcsúsznak a projektorok, amit szintén célszerű a tervezéskor figyelembe venni. A másik probléma a fényerők kérdése. Egy tipikus projektor nem egyenletes fényerővel világítja meg az összes pixelt, a lencserendszerének köszönhetően a kép széle felé enyhén sötétedik a kép. Ez egyetlen projektor esetén nem tűnik fel, de több projektor összeillesztésekor szintén kezelendő feladat.

Előfordul, hogy nagy méretű megjelenítő gyanánt **több képernyő** összeillesztésével (videofal) oldják meg a megfelelő látványt. Ez számos újabb problémát vet fel. A hétköznapi életben használt videokártyák maximum három képernyőt képesek meghajtani és azok összpixelszáma is többnyire korlátokba ütközik. Természetesen léteznek olyan videokártyák is, amelyek fel vannak készülve ilyen feladatokra (pl. Matrox-, Via-videomeghajtók), de olyan többképernyős megjelenítőeszközök is vannak, amelyek gyárilag kerültek összeillesztésre (pl. Cinemassive-rendszerek) és az interfészük egy hagyományos képernyőével kompatibilis, a képernyőkre való szétosztást beépített elektronika végzi, így egyszerű videokártya is képes meghajtani. Kereskedelmi forgalomban kapható olyan eszköz is, amely hagyományos interfészen kapcsolódik a videokártyához és maga állítja elő a videofal elemeinek interfészét.

A kép előállításánál gyakran előfordul (még professzionális környezetben is), hogy a képernyők illesztésénél nem veszik figyelembe a megjelenítőeszköz keretét (bezel), ezért torz eredményt nyújtanak. Több képernyős megoldásoknál minden esetben szükség lenne a bezel-korrekció elvégzésére, vagyis a tartalom olyan módon történő átszámítására, mintha a képernyő kerete csak kitakarná a látványt (4.17. ábra).



4.17. ábra: Kijelzők illesztése bezel-korrekció nélkül (bal) és bezel-korrekcióval (jobb) (Forrás: a szerző által készített ábra.)

4.6 Hangmegjelenítés

A hang alkalmazása virtuálisvalóság-rendszerekben nagy mértékben képes növelni az immerziót. Ehhez azonban nagyon fontos, hogy a hang konzisztens legyen a látvánnyal. A konzisztenciát megvalósítani azonban sokkal összetettebb, mint elsőre tűnik.

A virtuális 3D-s hang eltér a megszokott sztereó vagy dolby surround hangrendszerektől. A térérzet természetesen ott is nagymértékű lehet, ugyanakkor a térben való mozgás során nem alkalmazkodnak a felhasználó pozíciójához és orientációjához. Ez különösen igaz a fejhallgató alapú megoldásokra. További gondot jelent, hogy míg egy hagyományos hangrendszerben – amely nem kapcsolódik látványhoz – a felhasználó „valahova” képzeli a hangot, egy virtuálisvalóság-rendszerben ez nem megengedhető, a hangnak onnan kell érkeznie, ahol a vizuális látvány található.

Az érzékelt hang pozícióját számos tényező befolyásolja, amiket figyelembe kell vennünk a hangmegjelenítés során [Starch 1908]. A tényezők egyik fele a hangrendszerben alkalmazott komponensek minőségéből, a másik a felhasználó által „megtanult” hangi összetevőkből (késleltetések, hangerők, fázistolások, amplitúdó-karakterisztika stb.) ered.

Az eszközök terén olyan megoldást célszerű választani, ami a teljes hangrendszert figyelembe véve a beérkező digitális jelet olyan módon képes visszaadni, hogy az eredeti jelből a hallható tartományon belül sem a frekvenciafüggő amplitúdó-karakterisztikában, sem a fáziskarakterisztikában (az egyes frekvenciák késleltetésében) nincs torzulás, egy az egyben azt a hanghullámot adja vissza, amit a virtuálisvalóság-motor előállít. Ebbe természetesen beletartozik a digitális–analóg átalakító, az egyes erősítő fokozatok, a hangátviteli közegek (kábelek) és a hangot előállító végberendezések (hangszórók, fejhallgató). Egy ilyen összetett rendszerben gyakorlatilag elképzelhetetlen a teljes torzításnélküliség és a közel torzításmentes rendszer felé haladva olyan mértékben megnövekedhet a szükséges anyagi ráfordítás, hogy a projekt költségvetése nem viseli el.

Az emberfüggő algoritmikus komponens sem sokkal könnyebb, a megfelelő eszközök itt is igen költségesek lehetnek a szükséges számítási kapacitás és az algoritmusok kialakításához szükséges mérnöki és egyéb műszaki tevékenységek miatt.

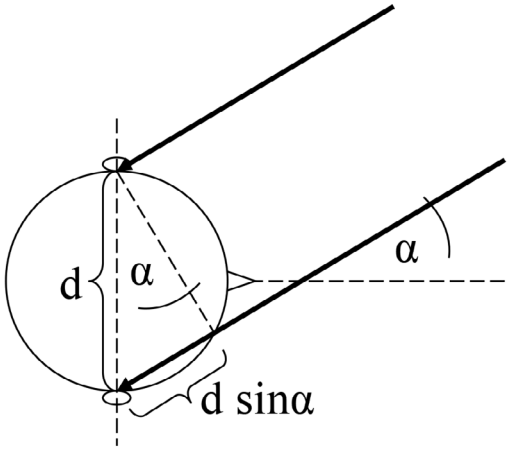
Annak érdekében, hogy ehhez közelebb kerüljünk, szükséges annak megismerése, hogy az ember milyen módon érzékeli az irányokat és a távolságokat. A továbbiakban először ennek főbb összetevőivel foglalkozunk, majd a technikai megoldás alternatíváit ismertetjük [Atal–Schroeder 1962].

4.6.1 Oldalszög érzékelése

A hangforrás iránya alapvetően két komponensű: oldalszög (azimut), magassági szög (a harmadik forgásirány a hang szempontjából lényegtelen).

- Az oldalszög meghatározása alapvetően két paraméter alapján történik: a két hang közötti időkülönbség, ill. a két hang közötti hangerőkülönbség alapján. Az utóbbi leginkább a nagyon közeli hangok esetén releváns.
- A magassági szög érzékelése elsődlegesen tanult folyamat, az idegrendszer a környezet hangjainak torzulása alapján következtet (lásd 4.6.2. szakasz).

A két fülbe érkező hang közötti időkülönbség (ITD, Interaural Time Distance) közepes és nagy távolságok esetén elsődleges, ilyenkor ugyanis a két fül közötti hangerőkülönbség elhanyagolható. A 4.18. ábra szemlélteti a két fül közötti késleltetést.



4.18. ábra: Fülközti időkülönbség
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

A késleltetés mértéke az orr tengelyével bezárt szögtől függ, a mértéke pedig:

$$ITD = \frac{d \cdot \sin \alpha}{c},$$

ahol d a fejek közötti távolság, α az orr tengelyével bezárt szög, c pedig a hang sebessége. Ezek alapján az ITD értéke nagyjából 0–600 μs közé esik (0 esetén szemből, 600 esetén oldalról érkezik a hang). Periodikus hangok esetén az irány meghatározása kicsit nehezebb, ott ugyanis a késleltetés már nem ismerhető fel, ilyen esetben az idegrendszer a két hullám közötti fáziseltolódást érzékeli. Ez olyan szempontból jelent nehézséget az emberi agynak, hogy a 600 μs értéknél nagyobb félhullámhosszú periodikus hangok érzékelése ambivalens lesz, mivel az agy úgy érzékelheti, hogy a másik irányból érkezik a jel hamarabb. Ennek megfelelően a 800 Hz feletti periodikus hangok irányát az agy kizárólag az ITD alapján nem tudja meghatározni.

Az irányhallás másik fő összetevője a két fülben érzékelt hangerőkülönbség (IID v. ILD – Interaural Intensity/Level Difference). Ez elsődlegesen akkor érvényesül, amikor a hang közel van hozzánk. Bár a hangintenzitás a távolsággal négyzetesen csökken (ezáltal nagyobb különbség érzékelhető a két fül között), már 2 m távolságban a 90°-os oldalszögből érkező hang esetén is kevesebb az intenzitáskülönbség, mint 20%, ami a logaritmikus jelleggel működő emberi hallás esetén minimálisan befolyásolja az irányérzetet.

A kereskedelemben elérhető médiatartalmak ennek ellenére elsődlegesen erre építenek, ugyanis, ha a tartalmat két vagy több hangszórós megoldással jelenítjük meg, akkor ez közelíti meg leginkább a felhasználó által elvárt érzetet. A hangszórókból érkező jelek ugyanis összekeverednek, ezért az ITD-ben megjelenített különbség teljes mértékben elveszik, ugyanakkor a hangszórók elhelyezéséből (a hangforrás nem a virtuális hangforrás, hanem a hangszóró pozíciója) következő ITD és IID következtében így halljuk a megfelelő távolságból. Amikor a tartalmat fejhallgatóval hallgatjuk, akkor ez a megoldás alapvetően nem szerencsés, mivel a fül a hangerőkülönbségek miatt úgy érzékeli, mintha a hangforrás nagyon közel lenne. Néha olyan megoldást alkalmaznak, ami ennek a kettőnek valamilyen keveréke, de az sem segít elegendő mértékben.

A harmadik összetevő, amelynek a magassági szög érzékelésében nagyobb szerepe van, a hangban bekövetkezett torzulás. Ez együtt jár egy tanulási folyamattal. Alapvetően ismerjük, hogy egy-egy hangforrásnak milyen az amplitúdó- és fáziskarakterisztikája, illetve az agyunk megtanulta azt is, hogy az egyes irányból érkező hangok hogyan torzulnak, hányszorosan és milyen módon verődnek vissza, ezek alapján meg tudja sejteni a hangforrás irányát. Oldalszög esetén a legfontosabb torzító tényező a fejárnyék hatása, amelynek a magasabb frekvenciájú hangok esetén fontos szerepe van (alacsonyabbak esetén leginkább csak az ITD dominál). Ismeretlen magasabb hangok esetén ez is egy ok, ami miatt sokszor nehéz meghatározni, hogy pontosan melyik irányból jön.

Az alacsony frekvenciájú hangok esetén (tipikusan 250 Hz alatt) a fáziskülönbséget bezavarja a tér akusztikája, ezért a hang kezdetét leszámítva egyáltalán nem tudja az agyunk meghatározni a hang forrását. Ennek köszönhetően a mély hangok előállítására szolgáló hangszórók elhelyezése egyáltalán nem kritikus, oda lehet őket tenni, ahol a legkényelmesebb.

4.6.2 Magassági szög érzékelése

Mivel két fülünk van, a magassági szög érzékelése a közvetlen fizikai tulajdonságok alapján (hangerőkülönbség, időbeli eltérés) nem lenne lehetséges. A magassági szöget kizárólag az előző szakaszban ismertetett amplitúdó, fázistorzítás és többszörös visszaverődés alapján érzékeljük. Az oldalszöggel ellentétben itt azonban számos egyéb összetevő is befolyásolja a torzítást: a fül formája (elsődleges), a fej formája, a váll elhelyezkedése stb. Ez azért okoz nagy problémát a megfelelő virtuális hang előállításában, mert minden embernek más az „átviteli karakterisztikája”, vagyis nem lehetséges olyan, felhasználófüggetlen virtuális hang előállítása, mint a 3D-s látvány esetén. Ráadásul, az egyénre jellemző karakterisztika egy összetett, sokdimenziós függvény (HRTF, Head Related Transfer Function) [Wolfgang et al. 2010].

4.6.3 Távolság érzékelése

A korábban ismertetett IID nagyon fontos szerepet játszik a távolság meghatározásánál. A nagy intenzitáskülönbség ugyanis közelebbi hangforrást, míg a kisebb távolabbit feltételez. Ezzel a módszerrel pár méteren belül viszonylag nagy pontossággal tudja az agy meghatározni, hogy milyen távolságból jön a hang.

Másik fontos összetevő a hangforrás mozgásának sebessége (mozgásparallaxis). A közelben található hangok gyorsabban, míg a távolabb találhatók lassabban mozoghatnak. Itt az agy elsődlegesen a szögváltozást figyeli és abból is inkább az oldalszöget, mivel a magassági szög a gyakorlati életben ritkán változik érdemben és azt nem tanulja meg.

Egy hangforrásból érkező hang a verődések (másodlagos hangforrások) miatt minden esetben több helyről érkezik vissza, különféle késleltetéssel és eltérő hangerővel. Az első és a többi hang között eltelt időt szintén felhasználja az emberi agy a távolság meghatározására, ugyanis közeli hangok esetén a visszavert hangok aránylag később érkeznek, míg a távolabbról érkezők esetén kisebb a különbség az első és a következő hangok között.

Itt külön fontos megjegyezni, hogy a többi irányból érkezett hang összhangereje többnyire sokszorosa annak, ami a hangforrásból közvetlenül érkezik a fülbe, ezért az agy a hangforrás beazonosítását mindig az először érkezett hang alapján végzi. Ezt nagyon jól ki lehet használni nagy terekben (pl. stadionok) tartott koncertek esetén. Ha valaki nagy távolságról is élvezni szeretné a koncertet, akkor a színpad közelében olyan hangerőt kellene biztosítani, ami a közelállók számára nem csak fülsérülést, hanem akár azonnali halált is okozna. Ehelyett nagyon jól működik az, hogy a színpad felől halkan hallja a zenét, és a közelében elhelyezett nagy méretű hangszórókból késleltetve (a megfelelő érték nagyjából 10 ms) jelenik meg a szükséges hangerő. A késleltetés miatt viszont hangforrásként nem a közelben elhelyezett hangszórót, hanem a színpadot tekinti az agy a hangforrásnak.

Szintén fontos összetevő a megtanult hangminták rendszere. Ha suttogást hallunk, akkor tudjuk, hogy közelről jön, míg a szirénázó hang távolról. Emiatt, ha valamilyen szokatlanság történik (pl. egy fejhallgatóból érkezik egy tűzijáték hangja), nehezen tudjuk beazonosítani a hangforrást.

4.6.4 Virtuális hang előállítása

A korábbiakban ismertetett okok miatt a jó virtuális hang előállítása rendkívül összetett folyamat (a „tökéletes” gyakorlatilag nem kivitelezhető), ráadásul emberfüggő, ezért ezt nagyon sokszor kihagyják a virtuálisvalóság-rendszerekből, vagy valamilyen leegyszerűsített modellt használnak, ami akár csökkentheti is a bemerülésérzetet.

Ha jó minőségű virtuális hangot szeretnénk előállítani, fontos, hogy a felhasználó fejéhez – és a nevével ellentétben, a testéhez – kapcsolódó átviteli függvény (HRTF, Head Related Transfer Function) rendelkezésünkre álljon és a virtuális hangot az alapján állítsuk elő [Wolfgang et al. 2010] [Burdea–Coiffet 2003]. A HRTF egy rendkívül komplex átviteli függvény, amely figyelembe veszi a beérkezési oldal- és magassági szöget, a távolságot, illetve a frekvenciatartományt. Ezek alapján meghatároz egy amplitúdó- és fáziskarakterisztikát, jobb esetben a visszaverődésekkel is foglalkozik. Amikor egy meghatározott pozícióba szeretnénk mozgatni a virtuális hangforrást, akkor ezek alapján állítjuk elő a hang két fülbe transzformált változatát. A fentiekből egyértelműen látható, hogy egyrészt ez a megoldás csak a fülbe közvetlenül juttatott hangokkal (fejhallgatóval) működik, másrészt az is érzékelhető belőle, hogy egyetlen hangminta számítása is nagyon komoly erőforrásigényű, ami a hangforrások számával lineárisan nő.

A HRTF előállításánál a felhasználó fej- és vállformáját előállítják olyan anyagokból, amelyek nagyjából úgy viselkednek, mint az emberi szövetek és a fülkagylóba helyeznek nagyon jó karakterisztikájú mikrofonokat. Ezt a modellt egy visszaverődésmentes térbe helyezve minden irányból hanggal szórják meg a hallható frekvenciatartomány számos frekvenciáján és mérik a HRIR (Head Related Impulse Resonse) értékeit, amiből a HRTF számítható.

Arra természetesen nagyon keveseknek van lehetősége, hogy a saját fej- és vállformájához igazított HRTF adatai legyenek. Szerencsére viszonylag jó minőségű virtuális hang előállítható, ha a sajátunkhoz hasonló fejhez kapcsolódó HRTF-et alkalmazunk, ezért magasabb színvonalú gyártók előállítanak tipikus fejmintákhoz kapcsolódó HRTF-eket és azt használják a virtuális hang előállításánál (a felhasználó kiválaszthatja a hozzá leginkább hasonlót).

A jelenleg használatos személyi számítógépek teljesítménye nem igazán elegendő a számítások elvégzésére, különösen, hogy a grafikus megjelenítés, a fizikai szimulációk és az egyéb modellezési feladatok miatt már amúgy is eléggé leterhelt, ezért tipikusan célhardverre van szükség [Bilinski et al. 2014].

4.6.5 Hangszóróalapú megoldások

A 4.6.4. szakaszban ismertetett megoldás alapvetően fejhallgatóra épül. Vannak azonban megoldások hangszórókra is. Itt kétféle megközelítést alkalmazhatunk. Az egyik, hogy megpróbáljuk a fentiekben ismertetett hanghatást hangszórókkal előállítani. Ennek a megközelítésnek az a problémája, hogy egyrészt a HRTF eleve rárakódik, amit kompenzálni kell (figyelembe véve a hangszórók mindenkori elhelyezkedését a felhasználó mozgásban lévő füleihez képest), a másik, hogy a két fülbe érkező jelek összekeverednek, mindkét fül minden hangszóró jeleit hallja valamilyen átviteli karakterisztikával. Ez a probléma kiküszöbölhető, ugyanis a kisugárzott jel és a fül által érzékelt jel nagyon leegyszerűsítve, sztereorendszert feltételezve kifejezhető az alábbi módon:

$$\begin{bmatrix} y_{left} \\ y_{right} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{l,l} & h_{l,r} \\ h_{r,l} & h_{r,r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{left} \\ s_{right} \end{bmatrix}.$$

Ebből a H mátrix invertálásával meghatározhatjuk, hogy milyen s hangvektort kell előállítanunk, ha y hangvektort szeretnénk a felhasználó fülébe juttatni.

Ezen az elven működnek azok a gyártói megoldások, amelyek sztereo rendszer segítségével kínálnak olyan lehetőséget, mintha valamennyire térben hallanánk a hangot (pl. SRS TruSurround, VideoLogic SonicFury 3D). Természetesen egy nagyon leegyszerűsített modellt alkalmaznak.

A másik hangszóróalapú megoldáscsaládot a sok hangszórós megoldások képviselik. Ez esetben a virtuális hangforrás létrehozásánál a HRTF-et nem vesszük figyelembe, az irányt elsődlegesen a megfelelő hangszórókban megjelenített hangerők alapján állítjuk elő. Ez a megoldás több nagyságrenddel kevesebb számítási erőforrást igényel. Ha a felhasználó a térben nem mozog, csak a fejét forgatja, ezek megfelelő alternatívát jelenthetnek. (Ezért 3D-s mozikban ez a megoldás jól alkalmazható.) Bár a virtuális hangok az egy helyben maradás ellenére sem lesznek tökéletesen a kívánt pozícióban és a közeli hangok megjelenítése gyakorlatilag nem alkalmazható a pozicionálás pontatlansága miatt, a távolabbról érkező hangok szimulációja egészen pontosan elvégezhető.

Sokhangszórós eseteket figyelembe véve a hagyományos Dolby Surround (5.1, 7.1) megoldások mellett professzionális virtuális audiorendszerekben az oldalszög mellett a magassági szöget is figyelembe veszik. A hangszórókat tipikusan három szinten helyezik el, alsó réteg (a fej magassága alatt helyezkedik el, gyakran a padlón), felső réteg (a fej felett helyezkedik el, sokszor a mennyezet közelében), fej feletti réteg (jellemzően a mennyezetről lefelé irányítva). Annak ellenére, hogy sok hangszóró jeleit kell előállítani és itt is virtuális hangforrásonként kell a számításokat elvégezni, nem terheli meg jelentősen a rendszert, a jelek értékeinek meghatározása ugyanis sokkal egyszerűbb, néhány szorzással megoldható.

4.7 Erő- és tapintásmegjelenítés

A haptikus (ἁπτικός – tapintási) megjelenítési megoldások eredendően két eltérő osztályra bonthatók. Az egyik az erő-, a másik a tapintásmegjelenítéssel [Salisbury et al. 2004] foglalkozik. A kettőben közös, hogy egy olyan visszacsatolási rendszert képeznek, amelyben a felhasználó az eszközzel való érintkezés során kap információt a számítógéptől, nagy különbséget jelent azonban, hogy az eszköz az emberi vázrendszerre hatva befolyásolja-e a mozgást, vagy csak a bőrfelület, vagy a bőr alatti érzékszervekre hat. Ezek alapján a két osztályt az alábbi módon definiálhatjuk:

Tapintásvisszacsatolás *(Touch feedback)*: Az érintkező felület geometriájáról, a virtuális objektum érdességéről, csúszósságáról és hőmérsékletéről valós idejű információkat közvetítő eljárás. A felhasználó mozgását nem gátolja, illetve nem állítja meg a felhasználót a virtuális felületeknél.
Erővisszacsatolás *(Force feedback)*: A virtuális objektum felületének merevségéről, a tárgy súlyáról, tehetetlenségéről valós idejű információkat közvetítő eljárás. Aktív módon gátolja a felhasználó mozgását, akár meg is állíthatja.

A haptikus megoldások nagy mértékben képesek a bemerülésérzet növelésére – bár megfelelő vizuális visszacsatolással csökkenthető a haptikus rendszerek szükségessége. Haptikus visszacsatolást nem kizárólag speciális eszközök segítségével állíthatunk elő, egyéb (tipikusan valós objektumokra épülő) megoldások alkalmazására is lehetőség van, ahol a visszacsatolás a környezet natív tulajdonságait kihasználva állítódik kváziautomatikusan elő. Erre mutatunk példát a Tapintható felhasználói felületekkel foglalkozó 5.4. alfejezetben.

A jó haptikus visszacsatolás alapvetően rendkívül összetett feladat. Egyrészt a felhasználó számos különféle tulajdonságot érzékel, amelynek mindegyikét egyidejűleg ugyanazon a felületen kell szimulálni: a jég megfogásakor hideget, keménységet és nedvességet érzünk; a gumi tapintásakor rugalmasságot; a csiszolópapír felülete durva; egy kés hegye pedig szúró érzetet vált ki. A másik fontos probléma a megfelelő erők előállítása. Ahhoz, hogy érzékszerveinkkel egy kemény virtuális tárgyat érzékelni tudjunk, olyan erők („ellenerő”!) előállítására van szükség, amilyen erővel a felhasználó azt meg tudja fogni. Ekkora erők viszont komoly sérüléseket okozhatnak egy programozási hiba vagy valamelyik komponens megsérülése esetén. További gondot jelent a visszacsatolás során alkalmazott eszközök önsúlya. A relatíve nagy önsúly nagy mértékben képes csökkenteni a bemerülés hatását, ezért ilyen esetben a haptikus visszacsatolás bemerülésnövelő hatása csökken, vagy akár ellenkezőjére is fordulhat.

A fenti problémák miatt a legtöbb megoldás a kézfejre, illetve a csuklóra koncentrál (ezen belül is az eljárások többsége kifejezetten az ujjbegyeket célozza meg). A többi testrészünk zömében ugyan kisebb a szenzorsűrűség, mégis ennek van leginkább olyan hatása, amellyel a bemerülés hatása érdemi mértékben növelhető. Ennek ellenére vannak teljes test-megoldások is, ezek azonban vagy a kutatás nagyon kezdeti fázisában vannak, vagy olyan speciális területen alkalmazzák, amely a jelen tanulmány céljától távol esik, ilyen jellegű megoldások a közigazgatásban és okos városi környezetekben nem alkalmazhatóak hasznosan, ezekkel a jelen tanulmány nem foglalkozik.

Az alábbiakban a két osztály eszközkészletét egymástól függetlenül ismertetjük.

4.7.1 Tapintásvisszacsatolás

A megfelelő visszacsatolás érdekében számos olyan eredményt meg kell ismerni és természetesen fel is kell használni, amelyet az orvostudománytól tudunk kölcsönözni. Fontos tudnunk, hogy a szervezetünk egyes pontjain milyen térbeli és időbeli felbontással működnek az egyes szenzortípusok, hogy a megfelelő hatékonyságú visszacsatolást tudjuk előállítani.

A tapintásérzékelés során számos különféle tulajdonságot érzékelünk. Ezek stimulálása nem teljesen független egymástól, ezért kevesebb fajta jel előállítása elegendő lehet, de a teljes szenzorikus visszacsatolás még így is bonyolult. A nedvességérzet pl. megfelelő nyomás- és hőmérséklet-visszacsatolás segítségével tökéletesen előállítható.

A legfontosabb érzékelést a bőrünk felületére kifejtett nyomás jelenti. Fontos megemlíteni, hogy szemben a 4.7.2 Erővisszacsatolás szakaszban ismertetett eljárásokkal, itt nincsenek olyan erők, amelyek a felhasználó mozgását bármilyen mértékben is gátolnák. Kifejezetten a bőr és a bőr alatti érzékszervek által mért nyomásról van szó. Az ilyen stimulust előállító eszközöket az alábbi belső szenzorok érzékelik [Burdea–Coiffet 2003]:

- Pacini-testecskék → gyors érzékelők, de csak változást érzékelnek (mélyen a bőr alatt helyezkednek el).
- Meissner-testecskék → szintén gyors érzékelők és az ő esetükben sincs jel, ha nincs változás (felszín közelében helyezkednek el).
- Krause-féle végtest → a nyomás mellett hőmérséklet is képesek érzékelni.
- Ruffini-végtestek → tartós nyomás érzékelésére képesek, de alacsony frekvencián.
- Merkel-lemezek → lassú változásokat érzékelnek (mélyebben helyezkednek el a bőr alatt).

A fenti lista érzékelteti, hogy milyen összetett az emberi érzékelés. Egy eszköz kialakítása során fontos tudni, hogy milyen változásokra, milyen frekvenciákra kell felkészülni. Itt fontos megjegyezni, hogy sokszor nem elegendő a gyakorlatban előforduló mechanikai változásokra felkészülni, ugyanis nagyobb frekvenciájú rezgésekkel esetleg olyan érzékszerveket is stimulálhatunk, amelyek alapvetően hőmérsékletet érzékelnének és az agy nem tudja megkülönböztetni, hogy az elektromos potenciált a hőmérséklet megváltozása vagy egy magas frekvenciás rezgés váltotta ki.

A hőmérséklet-érzékelésre is több szenzor található a bőr alatt. A kifejezetten hőmérséklet-érzékelést végző érzékelők, termoreceptorok csak -15°C és +45°C között érzékelnek. Az e tartományon kívül eső hőmérsékleteket már csak a nonireceptorok érzékelik, amely az idegrendszerünkben fájdalomérzetként jelenik meg. Természetesen a fájdalomérzet növekedése esetén a hőmérséklet növekedésére is következtet agyunk.

Nagyon fontos kérdés az érzékelők elhelyezkedése az egyes szerveinkben. Bár a sűrűség még a hát esetén is magas (~100 érzékelő/mm2), ajkak esetén ennek tízszerese, az érzékelt felbontás ennél jóval alacsonyabb, ugyanis az érzékelők pontos elhelyezkedését az idegrendszer nem ismeri. A valós felbontás még ujjbegyek esetén is 2-3 mm, a tenyéren 1011 mm is lehet, a háton pedig jóval nagyobb. Ez olyan szempontból szerencsés, hogy az előállítandó eszközök felbontásának sem szükséges, hogy ennél jelentősen jobb legyen.

A tapintás-visszacsatolás eljáráskészlete a felhasznált fizikai megoldások tekintetében viszonylag széles. A fontosabb alkalmazott technológiák az alábbiak:

- *Légfúvás, fecskendezés:* egy vagy néhány befúvó egy területen. Mechanikai okok miatt nehéz megoldani nagyobb méretű 2D-s tömbök kialakítását.
- *Vibráló elektromos beavatkozók:* tipikusan egy excentrikus súllyal ellátott motor. Ebben az esetben sem megoldhatók a 2D-s tömbök.
- *Mikrotűk alkotta tömbök:* ezzel a technológiával előállíthatók – akár nagyobb területen is – 2D-s tömbök. A „tűk” távolsága alapvetően milliméteres nagyságrendbe esik (akár 2-4 mm távolságra egymástól).
- *Közvetlen elektromos ingerlés:* az eljárás során az eszköz a bőrt elektrotaktilis módon ingerli.
- *Neuromuszkuláris ingerlés:* az eszköz az idegrendszert közvetlenül ingerli. Bár ezzel az eljárással elméletileg tetszőleges „érzést” juttathatunk az idegrendszernek, a kutatások még elég kezdeti állapotban vannak. (Elsődlegesen inkább a műkezek érzékelésére koncentrálnak a kutatások)

Az utóbbi két technológia veszélyes, ami miatt kereskedelmi forgalomban nem kaphatók, kizárólag kutatási célra elérhetők.

4.7.2 Erő-visszacsatolás

Az előző szakasz elején ismertettük a tapintásérzékelés főbb belső érzékelőit. Az erő-visszacsatolás érzékelői elsődlegesen az idegvégződésekben, csontok közelében található Pacini- és Ruffini-végtestecskék, amelyek a csuklók helyzetét mérik, illetve az izom feszülését (is) érzékelő Golgi-készülékek és az izomnövekedés arányát érzékelő izomorsó receptorok. Az egyes csuklókban található érzékelők pontossága is eltérő. A test közelében található érzékelők pontosabbak, mivel hatásuk a végső pontokra (ujjak) jóval nagyobb, az ujjak felé pedig egyre rosszabb a felbontásuk. A csípő esetén a felbontás 0,2°, a váll 0,8°, az ujjak 2,5° míg a lábujjak 6,1° körül van. Ennek fontos következménye, hogy a kéz pozíció-visszacsatolásának pontosságigénye elég alacsony, ha a látvány pár centiméterrel eltér a mért kézpozíciótól, semmilyen érzékelhető hatást nem gyakorol az idegrendszerre. Fontos még megemlíteni, hogy az erőérzet a fáradtsággal növekszik (egyenletes erőkiadás során egyre nagyobb az erőérzet). Hosszabb bemerülés esetén célszerű a szimulált erőérzetet folyamatosan csökkenteni, ezáltal a felhasználóban állandó erőérzetet kelteni.

Fontos szempont az eszközök kialakításánál és kiválasztásánál, hogy a felhasználó milyen erőt képes kifejteni. A 4.2. táblázatban néhány fontosabb maximális erőkifejtés található. Maximális erőt az ember nagyon rövid ideig tud kifejteni, a maximális erő 25%-nak 10 percen keresztüli kifejtése már fájdalmas lehet (ilyenek pl. az izomgörcsök).

Nem	Erőteljes markolás	Csípés ujjhegyekkel[6]	Csípés ujjbegyekkel[7]	Kulcs-szorítás[8]
Férfi	400 N	65 N	60 N	109 N
Nő	228 N	45 N	43 N	76 N

4.2. táblázat: Tipikus maximális erőkifejtés
(Adatok forrása: [Burdea–Coiffet 2003])

Az erő felbontása ugyanakkor nem kifejezetten kritikus. Az ember állandó erőt 10-15% pontossággal érzékel (változót még nagyobb hibával). Az emberi szervezetben található receptorok nagyjából 20-400 Hz sűrűséggel érzékelik az erő változását, ugyanakkor az erőkifejtésünk frekvenciájának felső határa tipikusan 5-10 Hz.

4.7.3 Haptikus eszközök

A kitűzött céloknak talán leginkább a **taktilis egerek** felelnek meg. Bár az utóbbi időkben csökkent a felhasználók érdeklődése az ilyen termékek iránt, bizonyos fogyatékkal élők (tipikusan látásukban korlátozottak) számára segítséget jelenthetnek. Az eszköz egy hagyományosnak kinéző egér, amibe egy excentrikus teherrel ellátott motort (vibramotor) helyeztek, így taktilis visszacsatolásra van lehetőség. A visszacsatolás az egér mozgatása során információkat adhat arról, hogy mi található a képernyőn az egér alatt (pl. ablak kerete). Az ilyen egerekben a rezgés függőleges irányú (tenyeret) és nagyságrendileg 1 N erejű, ami ahhoz elegendő, hogy egyértelműen érezze a felhasználó. A függőleges rezgés segíti, hogy az egér vízszintes irányba (X és Y) ne – vagy minimálisan – mozduljon el. Taktilis egér választása esetén fontos a megfelelő, vastag egérpad kiválasztása, ellenkező esetben nagyon zavaró tud lenni, ahogyan az asztal átveszi a rezgéseket.

A **taktilis kesztyűk** ennél finomabb mértékben képesek a felhasználót a környezet tulajdonságairól tájékoztatni. Számos különféle megoldás elérhető. A leginkább klasszikus ezen a területen a CyberTouch, amelyen ujjanként egy, illetve a tenyéren még egy további vibramotor található. Az utóbbi időkben azonban számos újabb, más megoldásra épülő megoldás is megjelent a piacon. A CyberTouch megoldásában a motorok akár 125 Hz sebességgel is képesek forogni, ami a bőr közelében található emberi szenzorokat akár olyan módon is képesek átverni, hogy nedvességérzetet továbbítsanak az idegrendszer felé. Itt is nagyjából 1,25 N erőt fejtenek ki a motorok.

Hőmérséklet-visszacsatolásra alkalmas kesztyűkre kisebb az igény a hétköznapi emberek részéről, ezért kisebb is a piaca, ugyanakkor van olyan elérhető technológia, amely a problémát elfogadható módon kezeli. Itt nagyon fontos a gyors hőmérséklet-változás, ha hirtelen megfogunk egy hideg tárgyat, akkor „szimulátornak” hirtelen kell lehűlnie, majd elengedéskor visszamelegednie. Monkman és Taylor már 1993-ban publikáltak egy olyan megoldást, amely félvezetőalapú Peltier-pumpa elvére épülve nagy sebességű hőmérsékletváltozást tud generálni. Valójában azonban csak az utóbbi években jelentek meg olyan megoldások, amelyekhez könnyedén hozzá lehet jutni. A fő problémát azonban továbbra is az jelenti, hogy ezek a kesztyűk sok esetben nincsenek kombinálva nyomásra épülő technikákkal.

6 Hüvelyk- és mutatóujj.
7 Hüvelyk- és mutató- + középső ujj.
8 Hüvelykujj és a mutatóujj középső ujjperce közötti területének összeszorítása.

Az erővisszacsatolt eszközök közül az egyik legismertebb az **erővisszacsatolt joystick**. Ezek általában nagyon egyszerű felépítést rejtenek, így az áruk is viszonylag alacsony. Ugyanakkor amiatt, hogy egy nagyon kicsi motornak (a joystick belsejében) kell ellentartania egy komoly erőkarnak, amit ráadásul tipikusan marokkal, nagy erővel fog meg a felhasználó, az erővisszacsatolás alacsony hatásfokú. A többszáz newton erővel megragadott karra nagyjából 2-3 N ellenerőt fejt ki, így az is előfordulhat, hogy nem is érzékeljük. Ahol ennek mégiscsak van jelentősége, azok olyan felhasználási területek, ahol a kart az alkalmazás nagy sebességű rezgéssel mozgatja, ami miatt egy taktilis visszacsatolás jön létre (pl. helikopter-szimulátorok), de lágyan két ujjbegy közé fogva az erővisszacsatolás is használható.

Egy másik erővisszacsatolási megoldás az **erővisszacsatolt ceruzák**. Tipikusan mechanikus követővel működő 3D-s ceruzák, amelyekben a 3D-s pozíció és orientáció meghatározása olyan módon történik, hogy ismert hosszúságú fix szegmensek között csuklók találhatók, amelyeknek állását szenzorok mérik, ezáltal direkt kinematikai eljárások segítségével kiszámíthatóak a kíván értékek., Mivel a csuklókban erővisszacsatolást is elhelyeztek, képesek arra, hogy a ceruzával a „megérintett” tárgyakról információt kapjon a felhasználó. Ezen eszközök általában nagyobb erővisszacsatolást tartalmaznak (a nagyobb változatok akár 8-10 N-t is), ráadásul a ceruzát a felhasználó precízebb munkára használja és a megmarkolás helyett finomabban fogja meg, ezért az ilyen eszközökben sokkal erősebb a visszacsatolás érzete. Tipikus mechanikai sávszélesség 10-15 Hz körül van.

Az **erővisszacsatolt kesztyűk** (nem összekeverendő a taktilis kesztyűkkel) jelentik a terület csúcskategóriáját. Sokáig itt is csak egy szereplő volt a piacon (CyberGrasp, ill. CyberForce, ha a külső visszacsatolást is beleértjük), de az utóbbi években több eszköz is elérhető. Az erővisszacsatolt kesztyűk esetében általában egy komoly mechanika helyezkedik el az ujjakon és a kar egyéb területein (maguk a motorok többnyire nem az ujjon találhatók), amely képes az ujj mozgatására azt az érzetet keltve, hogy az ujj nekiment valamilyen tárgynak. Elég komoly problémát jelent az immerzió szempontjából a kézfejen megnövekedett súly, ezért általában, amit csak lehet eltávolítanak a kézről és különösen az ujjakról, illetve valamilyen vezető drót viszi át az erőt egy máshol elhelyezett motorra. Egy másik fontos tényező, hogy az ujjakra ható erőt nem szabad nagyon magasra méretezni, mivel az sérülést okozhat, ezért ezt tipikusan viszonylag alacsony értéken tartják (15-20 N), ami miatt a kemény tárgyak szimulálása nem igazán lehetséges.

A kesztyűs visszacsatolás önmagában nem teszi lehetővé, hogy a visszacsatolás során súlyt („tömeget”) ábrázoljunk, vagy egy virtuálisan rögzített tárgyat fogunk meg, ezért kiegészítésként egyes esetekben egy olyan erővisszacsatolt állványzatot is illesztenek a rendszerbe, amelyhez hozzárögzítve az erővisszacsatolt kesztyűt ez is lehetséges. A fent említett CyberForce egy ilyen megoldást biztosít.

5. KÜLÖNLEGES FELÜLETEK, MEGOLDÁSOK

Ebben a fejezetben néhány, már elérhető, vagy kutatási szakaszban lévő, megoldást mutatunk be, amelyek a 2. fejezetben leírt problémákra adnak megoldást olyan eszközök segítségével, amelyeket a 4. fejezetben mutattunk be. Az egyik kritikus kérdéskör arra vonatkozik, hogy a sok információt kezelő felhasználók hogyan tudnak minél jobban kiigazodni az információk között, illetve, hogy minél hatékonyabban legyenek képesek azokat kezelni.

5.1 Több nézetablakos megoldások

Már több évtizede megjelent a Linux-, majd később a MacOS-rendszereken, de ma már a Windows-rendszereken is elérhető (igaz ez utóbbin még most is akadnak gondok és kicsit kényelmetlen is a használata) az a megoldás, hogy rendszerünkön több asztalt is használunk és azok között váltunk, ahelyett, hogy alkalmazások között váltanánk. Ez segíthet abban, hogy teljes képernyőn használhassuk alkalmazásainkat. Alapvetően szerencsétlen az egymás mögötti ablakok használata, sokkal jobb, ha több ablakot szeretnénk egyidejűleg használni, akkor valamilyen mozaik elrendezésbe helyezzük (más rendszereken szintén nagyon régen elérhető ennek automatikus változata, de a Windows 7 óta már a Windows is támogatja) és egyáltalán nincs egymás mögött több ablak.

5.2 Nagyítható felületek

Szintén több évtizede volt elérhető a Linux-rendszereken olyan megoldás, hogy az asztal mérete nagyobb, mint a képernyő mérete, és azon belül lehetett mozogni, így elérve azon alkalmazásokat, amelyek éppen nem láthatók. Ez a megoldás rendkívül szerencsétlen, nem csak azért, mint említettük, hogy az ablakok inkább teljes, esetleg félképernyő méretűeknek célszerű lennie, hanem ezt még tovább rontjuk azzal, hogy az ablakok kilógnak az adott képernyőről, a navigáció is komoly kognitív befektetést igényel. Szerencsére ezt az ötletet mára végleg elfelejtette a szakma.

Az azonban továbbra is gyakran előfordul, hogy olyan ábrákkal, rendszerekkel van dolgunk, ahol szükségünk van a teljes kép átlátására és a részletekére is. Ilyen esetekben nagyítható felületet (ZUI, Zoomable User Interface) kell alkalmaznunk. Azon szoftverekben, ahol ez rendszeres feladat, a felületet általában jól kezelhetően megvalósítják, olyan esetekben, ahol erre ritkán van szükség, a megoldás sokszor hagy kívánnivalót maga után. Ezt sokszor kiegészíti az, hogy egy ergonomikus kialakítás az egér korlátait valamelyest meghaladja (bár professzionális modellező és CAD-rendszerekben vannak olyan megoldások, amelyek egészen hatékonyak). Rendszerszintű támogatás nagyítható megoldásokra azonban nem igazán van.

A ZUI legfontosabb területe természetesen az építészet és egyéb mérnöki tevékenységek, ahol ráadásul háromdimenziós környezetben kell ezt a lehetőséget megvalósítani, de fontos szerepet kap vektoros és raszteres grafikus programokban is. Az egyéb

alkalmazásokra tipikus példa a Prezi bemutatókészítő rendszer, amely segítségével megfelelő megközelítéssel olyan bemutatók állíthatók össze, ahol nagyon jól lehet látni az összefüggéseket és a részleteket is. Itt nagyon jól érezhető Jeff Raskin elvének a követése, ahol nem egy meglévő felhasználói felületi gondolkodásmód adaptálásával oldják meg a problémát, hanem a feladathoz alakítják ki. Számos egyéb helyen indokolt lehetne a ZUI használata és ezt operációs rendszer szintjén lenne szükséges kezelni, de erre a közeljövőben nem nagyon várható megoldás.

5.3 3D-s munkafelületek

Korábban említettünk néhány példát arra, hogy milyen körülmények esetén lehet indokolt a 3D felhasználói felületek (3DUI) használata. 3D-s munkafelület alatt nem egy 2D-s képernyőn, a síkra levetített 3D-s objektumokkal való műveleteket értünk, hanem olyan megoldást, ahol a felhasználó eleve sztereo módon érzékeli a 3D-teret, esetleg (nem feltétlenül szükséges) körbe is járhatja a munkájának tárgyát [Lacoche et al. 2014].

Az emberi térlátás fontos eleme a sztereofeldolgozás, amelyről a 4.5 alfejezetben írtunk, különösen álló objektumok esetén nagyon sokat ad az érzékeléshez, ahhoz képest, hogy 2D képernyőn látjuk csak az objektumokat. Nagyon sok esetben láthatunk meg újabb összefüggéseket, észrevehetünk olyan hibákat a modellben, ami felett egyébként elsiklottunk volna. Egy CAD-modell szerelhetősége pl. tipikus példa. Ugyan ma már ezek az alkalmazások CAM- (Computer Aided Manufacturing) modulokat is tartalmaznak, amelyek segítségével ez ellenőrizhető, ennek modellezése azonban a gyakorlati életben gyakran nem kivitelezhető a határidők, illetve a sok extra befektetett idő miatt (ami néha természetesen visszaüt). A valós 3D-s megjelenítés nem jelent extra munkát, de felfedhet tervezési hibákat.

Amikor az első háromdimenziós rendszerek (még a 2D-s képernyőkön) megjelentek, az építészet és az orvostudomány elutasította, arra hivatkozva, hogy alaprajzon, illetve síkbeli tomográfiás metszeteken mindent tökéletesen ki lehet venni. Azonban a technológia és a 3D-s grafika fejlődésével rájöttek, hogy sok anomáliára lehet felfigyelni, ha nem csak 2D-s metszetekkel dolgozunk. Várhatóan a sztereó megjelenítés is hasonló sorsra jut majd az ilyen jellegű alkalmazások esetén.

Valójában már azt 3D-s munkafelületnek nevezhetjük, ha egy sztereó megjelenítő eszközt alkalmazunk, de az igazi 3D-s munkafelületek ennél komplexebbek. Többnyire nem alkalmazzák a hagyományos beviteli eszközöket sem, helyettük inkább a felhasználó természetes mozgására építenek, és olyan eszközöket alkalmaznak, amik a felhasználó mozdulatait és gesztusait képes követni és felismerni. A teljes bemerülés ritkán teljesül, inkább jellemző a kiterjesztettvalóság-rendszerek alkalmazása, mivel gyakran van szükség a környezetben található fizikai tárgyakra is.

A 3D-s munkafelületek vezérlésére is kétféle megközelítés van. Az objektummanipuláció lehetséges abszolút módon (a látott virtuális tárgyat a kezünkkel – vagy annak virtuális leképzésével – fogjuk meg és manipuláljuk), illetve relatív módon (az objektum nem kapcsolódik közvetlenül a kezünkhöz, az objektumokat valamilyen módon kijelöljük és a kezünk mozgása csak az objektum mozgását vezérli, de az abszolút elhelyezkedését nem). Ez utóbbi gyakoribb, mivel számos technológiailag kérdéses és komplex elemet nélkülöz, ugyanakkor a feladatok nagy részére tökéletes megoldást ad. Vannak azonban olyan feladatok, hogy egy virtuális objektum felületét,

vagy annak valamely részletét szeretnénk nagyon finoman módosítani, amit célszerűbb olyan módon végezni, hogy a tárgy előttünk van és úgy módosítjuk.

A 3D-s felhasználói felületeket kombinálhatjuk ZUI-megoldással, aminek a segítségével a virtuális térbe belenagyíthatunk és nagyon finom változtatásokat végezhetünk. A ZUI-megoldás abszolút és relatív manipuláció esetén is működik.

5.4 Tapintható felhasználói felületek

Virtuálisvalóság-rendszerekben nagyon gyakran merül fel az igény, hogy egy virtuális objektumot megfogjunk. Meglehetősen csökkenti a bemerülésérzetet, ha a virtuális objektumon könnyedén áthaladva, úgy fogja meg a felhasználó, hogy ebből semmit sem érzékel. A tapintható felhasználói felületek (TUI, Tangible User Interface) erre kínálnak megoldásokat [Ullmer–Ishii 2000].

Erre a problémára többféle megközelítés is létezik. A leggyakrabban alkalmazott megoldás, hogy a felhasználó kezében van egy kontroller és a kontroller segítségével fogja meg a virtuális tárgyat. Ez több szempontból is hasznos. Az egyik, hogy a kontroller pozícióját és orientációját sokkal könnyebb (és jelentősen olcsóbb) meghatározni, mint az ujjainkét, a másik, hogy a felhasználó eleve érzékeli, hogy valamit fog, a virtuális objektum pedig ehhez kapcsolódik, így nincs hiányérzete a tárgy fizikai létét illetően.

Igen költséges megoldás az, hogy olyan kesztyűt illesztünk a rendszerbe, amelyen erővisszacsatolás található. Bár ezek többnyire csak lágyabb, puhább objektumokat képesek szimulálni, mégis jó bemerülésérzetet nyújtanak azáltal, hogy egy ott lévő virtuális objektumhoz hozzá tud érni a felhasználó. Amennyiben nem szeretnénk kontrollert használni, és a projekt költségvetését sem szeretnénk magasba emelni, alternatív megoldásokhoz kell fordulni.

A kismonográfia elsődleges célja, hogy az államigazgatási feladatok megoldására kínáljon eszközöket, olyan környezetekkel foglalkozzunk, ahol a 3D-s felhasználói felület elsődlegesen munkafelület, ahol konkrét feladatok megoldása a cél. Ilyen esetekben a virtuális objektumokat jobbára ismerjük, és elkészíthetünk hozzájuk hasonló geometriai kialakítású fizikai objektumokat is [Szemenyei–Vajda 2017]. Megfelelő algoritmusok segítségével lehetőség van a fizikai objektumok követésére (tipikusan a számítógépes látás eszköztárával), illetve – amennyiben csak hasonló objektumok állnak rendelkezésünkre – a felhasználó szempontjából hasonló fizikai tulajdonságokkal rendelkező objektumok párosítására. Ennek köszönhetően a virtuális térben található objektum azon a ponton jelenik meg, ahol a fizikai párja, így a felhasználó azon a ponton a valódi tárgyat fogja meg, de a virtuálisat látja. Ezzel a megoldással alacsony költségen nagyon jó eredményt lehet elérni. A hátránya természetesen az, hogy a virtuális térben található és megfogandó objektumokhoz hasonló fizikai tárgyaknak a felhasználó közelében kell lennie. Alaposan megtervezett rendszer esetén ez nem igazán okoz problémát.

6. KITERJESZTETT- ÉS KEVERTVALÓSÁG-RENDSZEREK

Ebben a fejezetben a manapság egyre inkább terjedőben lévő kiterjesztettvalóság-rendszerek (Augmented Reality, AR) fontosabb szempontjait mutatjuk be. A kiterjesztett valóság egyesíti azon előnyöket, amelyek a valós környezetbéli látvány megőrzése mellett a digitális térből érkező információk alapján a felhasználó látóterébe kerülnek [Krevelen–Poelman 2010].

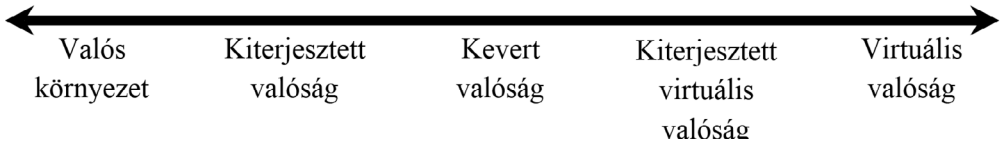
Bár a médiának köszönhetően az átlagfelhasználó számára a kiterjesztett valóság témaköre egy külön, nagy területnek tűnik, valójában nem más, mint a virtuálisvalóság-rendszerek egyfajta kiterjesztése. A fejezet ezekkel a szükséges kiterjesztésekkel foglalkozik.

6.1 A kiterjesztett és a kevert valóság

A szakirodalomban számos helyen olvashatunk olyan félreérthető fogalmakat, amelyek tisztázása fontos lehet. A kiterjesztett valóság (Augmented Reality, AR), illetve a kevert valóság (Mixed Reality, MR) fogalmak nagyjából ugyanazt a fogalmat takarják, vagyis, hogy a valós környezetet digitális információval keverve jelenítjük meg, illetve a valóságba illesztünk vetítés segítségével számítógéppel generált információkat. Korábban az összes ilyen alkalmazást kiterjesztettvalóság-alkalmazásnak nevezték, de az utóbbi időben a fogalom kettévált.

Bár a szakirodalom sok helyen keveri a két fogalmat, viszonylag elfogadott különbség, hogy a kiterjesztett valóságban a virtuális tárgyak, információk csak lazán kapcsolódnak a valósághoz, nincs interakció a virtuális és a valós tárgyak között. Ezzel szemben a kevert valóság úgy tesz, mintha a virtuális tárgyak a való világban lennének elhelyezve, azokkal együttműködik, együtt mozog.

A teljesen valós környezet és a tisztán virtuális valóság között szinte folytonos átmenettel találhatók fokozatok (6.1. ábra). A valós környezet minimális kiegészítése esetén használjuk a kiterjesztett valóság fogalmat, míg a virtuális környezetbe helyezett minimális valós elemek által meghatározott környezetet hívjuk kiterjesztett virtuális valóságnak (augmented virtuality).



6.1. ábra: Virtuális- és kiterjesztettvalóság-rendszerek viszonya
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

6.2 A virtuális és a kiterjesztett rendszerek különbségei

A kiterjesztett- és a kevertvalóság-rendszerek az alkalmazások terén nagy mértékben különböznek a virtuálisvalóság-rendszerekétől. A mindennapi munka során a tiszta virtuálisvalóság-rendszerek ritkán hasznosak, többnyire valamilyen kevert megoldást alkalmazunk. A tiszta rendszerek elsődlegesen játék céljára alkalmasak.

A másik fő különbség a felhasznált eszközök területén jelentkezik, amelyek részben technológiaiak (pl. egy speciálisan kialakított optikai áteresztésű kevertvalóság-szemüveg), részben jelfeldolgozásiak és számításiak.

Jelfeldolgozás szempontjából a legfontosabb különbség, hogy míg a virtuálisvalóság-rendszerekben az egyes objektumok, kéz- és fejpozíciójának meghatározása pontosság szempontjából egyáltalán nem kritikus (a remegés természetesen igen), addig kevertvalóság-rendszerekben kifejezetten nagy pontossággal kell meghatározni ezen pozíciókat. Ennek oka, hogy a belső szenzoraink pontossága is nagyon alacsony, ha 5 cm-rel odébb jelenik meg a kezünk a virtuális térben, fel sem tűnik[9], de kevertvalóság-rendszerekben, ahol a valós kéz látszik, az objektum pedig virtuális, meglehetősen zavaró lenne, ha az objektum 5 cm-rel odébb lenne, mint a kezünk. Természetesen technológiailag ez nem különbözik a virtuálisvalóság-rendszerek eszköztárától, de mindenképpen drágább eszközöket kell választanunk kevertvalóság-rendszer esetén. Kiterjesztettvalóság-alkalmazásoknál, ahol a virtuális objektumok csak lazán kapcsolódnak a környezethez (sohasem kapcsolódik össze a virtuális és a valós objektum), ez szintén nem probléma.

A kevert és kiterjesztettvalóság-rendszerek megjelenítésekor többféle technológiát alkalmazhatunk. A legelterjedtebbek és egyben legegyszerűbbek az ún. **video see-through** technológiák. Ez a megoldás azt jelenti, hogy a valós térről egy kamera segítségével nyerünk információt és a kameraképre rendereljük a virtuális objektumokat. Sokszor csak egy kamera képével dolgozunk (a mobiltelefonok esetén ez természetes, de HMD-k esetén is gyakori), de komolyabb fejre szerelhető megjelenítőkben mindkét szemhez tartozik egy-egy kamera. A video see-through technológia – elsősorban a mobiltelefonok fejlődésének köszönhetően – mára széles körben elérhetővé vált.

A másik megjelenítési technológiát az **optical see-through** megoldások jelentik (6.2. ábra). Itt a kamerakép helyett a valós képet egy valamilyen mértékben áteresztő felület biztosítja. Nagyon nagy előny, hogy a kameraalapú megoldással szemben itt a felhasználó a valóságot teljes egészében látja. Hátrányt jelent ugyanakkor, hogy a valóság és az objektumok illesztése sokkal komplexebb feladat, sokkal nagyobb pontosságot igénylő szenzorokat kell használni. Amennyiben nem kevert, csak kiterjesztett valóságról beszélünk, a feladat valamennyivel könnyebb, de ott is zavaró lehet, ha a virtuális objektum nem mozog együtt a környezettel – még ha nincs is közvetlenül összekötve egyetlen valós objektummal sem. Másik nagy hátránya, hogy a jól működő optical see-through technológia rendkívül drága. Ráadásul még a drágább eszközökben is olyan problémákkal találkozhatunk, hogy a virtuális objektumoknak világosoknak kell lenniük, mert minél sötétebbek, annál átlátszóbbak lesznek. A fekete színt a teljes átlátszóságra használják (néhány eszközben ezt a problémát megoldották már – pl. Microsoft Hololense). A fejre szerelhető megjelenítők mellett, nagy méretű kiterjesztettvalóság-kijelzők is elérhetők – bár ezek valós haszna megkérdőjelezhető.

9 Próbáljuk meg csukott szemmel összeérinteni az ujjainkat.

6.2. ábra: Optical see-through szemüveg (Vuzix 1200)
(Forrás: a szerző felvétele.)

Egy harmadik megoldás a valós tér használata, úgy, hogy a megjelenítés projektor segítségével történik, **közvetlenül a valós térbe**. Ez a megoldás speciális környezetekben használható jól. Ilyen lehet egy berendezés előtt álló lakás, ahova a falra vetítve élőben megtekinthető, hogy milyen lesz a végeredmény. Sztereo megjelenítési technológiával és fejkövetéssel akár a fal síkjától eltávolodott objektumok is megtekinthetők. Egy ilyen megoldásban nagyon komplex lehet a projektorok megfelelő kalibrációja. Egyrészt gondot okoz a CAVE-rendszereknél korábban ismertetett több projektoros illesztés, de még ennél is nagyobb problémát jelent, hogy többnyire nem garantálható a sík felületre történő vetítés, ami további nehézségeket vet fel (geometriai transzformációk, fókuszbeállítás stb.). Az is problémát jelent, hogy a projektorok többnyire ugyanabban a térrészben vannak, ahol maga a felhasználó, ezért a kitakarás is nehezíti a használatot. Ez utóbbi több projektor átváltásának segítségével kezelhető, de az is nagyon megnöveli a rendszer költségét (az alkalmazás kifejlesztését is beleértve).

6.3 Optikai kapcsolat a virtuális és a valós tér között

A valóság és a virtuális valóság keverésekor az is nehézséget okoz, hogy a két látvány konzisztens legyen. Többnyire a mai rendszerek ezzel nem foglalkoznak, ezért a virtuális objektumok nagyon egyértelműen elkülönülnek a valódi környezettől. Olyan esetben azonban, ha egy kevertvalóság-rendszerben azt szeretnénk érzékeltetni, hogy a virtuális objektum ténylegesen ott van a valós térben, több tulajdonságra is oda kell figyelnünk.

Az egyik kérdés a megfelelő **árnyalás**. Egy jó kevertvalóság-rendszernek fel kell ismernie a környezet fényforrásait és azt a virtuális objektum megjelenítésekor alkalmazni kell. Ilyen esetben nem közvetlenül a fényforrást vizsgálják, hanem azt elemzik számítógépes látással, hogy egy adott ponton milyen irányból milyen erősségű és színösszetevőjű fény érkezik. Egy egyszerű megoldás, ha a valós térben elhelyezünk egy fehér, teljesen diffúz gömböt (pl. pingponglabda) és annak a felülete alapján jó közelítéssel ez megmondható.

Egy másik hasonló és részben összefüggő kérdés az **árnyékkezelés**. Ezt szintén a környezet fényviszonyai határozzák meg, ugyanakkor itt azt is fontos tudni, hogy milyen geometriája van a valódi tárgyaknak, hiszen a virtuális árnyékoknak ahhoz kell igazodnia. Ráadásul egy valódi tárgy is vethet árnyékot egy virtuális objektumra, ezért ez a kérdéskör jóval összetettebb, mint az árnyalásé.

A harmadik, még szintén nagyon fontos kérdés a kitakarások kérdése. Ehhez is szükségünk van a valódi környezet geometriai modelljére, ugyanis ha a valódi objektum kitakarja a virtuálisat, akkor ott egyszerűen nem kell megjeleníteni a virtuális objektumot. Itt is igaz, hogy a modell megalkotása nem egyszerű, de ha az megvan, akkor magát a kitakarást megoldani nem kifejezetten nehéz feladat.

A fentieken felül van még néhány kevésbé fontos optikai hatás, ami a két rendszer között hathat. Az egyik a **globális illuminació**, ami azt jelenti, hogy ha egy objektum az ő saját színével is hathat egy másik objektumra (egy nagy piros objektum mellett lévő fehér lap valamelyest piros lesz), illetve ehhez hasonlóan a **többszörös sugárvetítődés** megoldása sem triviális (pl. átlátszó, áttetsző tárgyak – akár a virtuális, akár a valós térben).

7. EGÉSZSÉGÜGYI ÉS TÁRSADALMI HATÁSOK

A jelen fejezet célja, hogy ismertesse a virtuálisvalóság-rendszerek fontosabb emberi tényezőit. Az emberi tényezők meghatározásánál alapvető feladat, hogy megvizsgáljuk a felhasználók viselkedését, teljesítőképességét, foglalkozzunk az egyes kapcsolódó betegségekkel (pl. kiberbetegségek), illetve nagyon fontos elem az ilyen rendszerek társadalomra gyakorolt hatása [Burdea–Coiffet 2003].

Fontos megjegyezni, hogy nincs minden részletre kiterjedő emberi modellünk, illetve, ha lenne, akkor is olyan nagyságrendű dimenziójú feladat lenne, hogy matematikai módon a teljes rendszer jósága nem fogalmazható meg. Emiatt az emberi tényezők vizsgálata valamilyen mértékben szubjektív tudománynak tekintendő.

7.1 Módszertan és terminológia

Az emberi tényezők vizsgálatának főbb területei:

- **használhatóság**: annak a kérdésnek a vizsgálata, hogy hogyan lehetne a rendszert továbbfejleszteni a könnyebb használhatóság érdekében;
- **felhasználói teljesítmény:** a felhasználók reakciójának vizsgálata adott szimulációs és hardveres környezetekben;
- **felhasználói biztonság:** annak vizsgálata, hogyan lehet a kiberbetegséget, illetve a sérülésveszélyt csökkenteni;
- **társadalmi kérdések:** a virtuális valóság és terek hatásának mérése a társadalomra nézve.

A módszertan mindegyik esetben hasonlóan épül fel. A legkisebb eleme a vizsgálatnak a *kísérletek*. A kísérletekből *sorozatok* készülnek, amely kísérletek egymás után kerülnek végrehajtásra. A vizsgálat pedig több sorozatból áll, amelyeket pihenő szakaszok kötnek össze.

Egy vizsgálat megtervezésekor meg kell határozni a kísérletek típusát, a kísérletek számát sorozatonként, az egy nap alatt lefolytatandó kísérletsorozatok számát és eloszlását, illetve, hogy hány napon keresztül történik a vizsgálat. Egyes komponensek vizsgálatánál arra is szükség lehet, hogy hetek, hónapok kihagyásával a sorozatokat megismételje a vizsgáló személy vagy szervezet.

A vizsgálat megtervezésénél további nagyon fontos elem a résztvevők száma és köre. A nagyobb létszám a vizsgálat megbízhatóságát növeli, a résztvevők köre viszont több eredményt biztosít. Ezek az eredmények nagyon fontosak a virtuális- és kiterjesztettvalóság-környezetek hatásainak megértéséhez. Bár sok egyéb elem is hatással van az emberre, a legfontosabb szempontok a résztvevők kiválasztásánál:

- nem
- kor
- élethelyzetek (pl. terhesség)
- aktuális állapot (fáradtság, alkoholos befolyásoltság).

7.2 Egészségügyi és biztonsági kérdések

Az egészségügyi és biztonsági kérdéseket két fő területre oszthatjuk. A közvetlen hatások alapvetően a szerveken keresztüli energiaátvitel hatásait jelentik. Ez a terület elsődlegesen a lehetséges sérüléseket vizsgálja, illetve azt, hogy milyen módon lehet ezeket elkerülni. A közvetett hatások egy sokkal összetettebb kérdéskör, amelyek vizsgálata is sokkal nehezebb. Ezen kérdések közé tartoznak a neurológiai, pszichológiai és szociológiai hatások, valamint a korábban már említett kiberbetegségek, melyek nagyon komoly problémát jelentenek, ezért külön foglalkozunk velük.

7.2.1 Közvetlen hatások

Az egyik legfontosabb vizsgálati elem a közvetlen hatások kérdésköre. Ez egy viszonylag könnyen, tudományosan megközelíthető kérdéskör, amelynek nagy részét emiatt nem is a 7.1 szakaszban leírt módszerekkel, hanem közvetlen mérésekkel vizsgáljuk.

A közvetlen hatások vizsgálata során foglalkoznunk kell a fény- és hanghatásokkal, a bőrrel kapcsolatos kérdéskörökkel és nagyon fontos az egyes eszközök izomra és csontozatra gyakorolt hatása.

Fényhatás

A fényhatás elsődlegesen a szemre koncentrálódik és nagyon fontos összetevői a fényintenzitás mértéke és tartalma (fény hullámhossza, modulációja) is. Helytelen használat esetén egyes eszközök sérthetik a szaruhártyát, retinaégést okozhatnak, de közvetett hatásuk is lehet, amelyet szintén itt említünk:

- **Retinamegjelenítők:** lézeralapú fejre szerelhető megjelenítők, amelyek közvetlenül világítják meg a retinát. 1. biztonsági osztályú eszközök, maximális megengedett teljesítmény 400 nW. Ennél nagyobb teljesítmény sérülést okozhat a szemben.
- **Szemkövető eszközök:** a szemkövetőkben alkalmazott infravörös ledek nagy teljesítmény esetén hosszabb távon hályogképződéshez vezetnek. Mivel nem látjuk a fényt, észre sem vesszük. Maximálisan megengedett teljesítmény 76 μW.
- **Látványcentrumok:** A bemerülésérzet növelésére alacsonyfrekvenciás (1–10 Hz) fényimpulzusokat használnak (stroboszkóp). Az ideghálózatra kifejtett folyamatos triggerek amellett, hogy ténylegesen segítik egy virtuális környezetben is a bemerülés érzetét (hasonló a cél a szórakozóhelyeken is), egyes emberekben rövid eszméletvesztést eredményezhetnek (többnyire maguk számára is észrevétlenül). Az ismétlődő alkalmak az agy sérüléséhez vezethetnek. Alacsony képfrissítési frekvencia is okozhat hasonló problémákat.
- **Figyelemfelkeltés:** A villogás olyan esetben is okozhat problémát, amikor nem a környezet megvilágítása változik, csak egy nagyobb felület. Különösen piros szín villogása (pl. 2–3 Hz) epilepsziás eseményeket válthat ki arra érzékeny embereknél.
- **Hanggal kombinálva:** A pulzáló hang és kép hosszabb időn át való érzékelése nagyon könnyen vezethet migrénhez az erre hajlamos emberek esetén (a nők 20%-a és a férfiak 10%-a hajlamos migrénre, az ő esetükben amúgy is célszerű elkerülni az immerziót és az ilyen alkalmakat).

Hanghatások

A túlzottan nagy hangerő a fül rövid, illetve hosszú távú sérülését eredményezheti. Az ember dobhártyája ugyan képes regenerálódásra (egy átszakadás után is), a regeneráció után ugyanakkor semmiképpen sem lesz olyan az ember hallása, mint korábban, az összeforradás nem lesz megfelelő.

Az emberi fül hallási tartományát 0 és 140 dB között értelmezzük, amely egy logaritmikus skála. Az átlagember 20 dB alatt nem nagyon érzékeli a hangokat (10 dB lehulló falevél, 20 dB falevelek zizegése), természetes körülmények között 60 dB körül érzékel (ez az átlagos emberi beszéd hangereje) és 80 dB értékig tekinthető elfogadhatónak (nagy forgalmú út közelében, csengő stb.). A tartósan 80 dB-t meghaladó munkahelyek esetén a fülvédő használata kötelező. Virtuálisvalóság-környezetekben 105 dB (pl. közeli helikopter, nagy dob) 1óra/nap engedélyezhető, illetve 115 dB (pl. hangosabb rockkoncert, közeli sziréna) esetén maximum 15perc/nap. 120 dB a fül tipikus fájdalomküszöbe, vagyis efelett már fájdalmas lehet a hang és sérülést okozhat, akármilyen rövid idő alatt.

A virtuális hang komoly problémát jelent emiatt. A virtuális hang pozíciója rögzített és amennyiben a felhasználó nagyon közel kerül hozzá, könnyedén előfordulhat, hogy a felhasználó túl közel kerül hozzá. A gyakorlatban a nagy hangforrásokhoz nem tud teljesen közel kerülni, mivel a fizikai eszköz ezt nem teszi lehetővé, de virtuális hang esetén ilyen korlát nincs. Hasonló a helyzet, ha maga a virtuális hang mozog és a felhasználónak rögzített a pozíciója. Ez különösen katonai kiképzéseknél jelenthet nagy gondot, mivel ott nagyobb teljesítményű eszközöket alkalmaznak. Ez esetben is fontos (lenne), hogy korlátozzuk a maximális hangteljesítményt.

Izmok, csontok

Az izmok és a csontok sérüléseinek szempontjából legfontosabb eszközök a haptikus, erővisszacsatolt felületek. Ezek közül is legfontosabbak az erővisszacsatolt adatkesztyűk, amelyek (sokszor nagy) erőt fejtenek ki az ujjakra, de az erővisszacsatolt joystickok, sőt, a nem megfelelően kialakított egyéb kézben fogható eszközök (egér, kontrollerek stb.) is okozhatnak problémákat. Sok esetben fordul elő íngyulladás vagy ínhüvelygyulladás (ujjakon, csuklón), izomfájdalmak, illetve egyéb ortopéd problémák.

Ezek a problémák nem csak olyan esetben jöhetnek elő, ha hibás egy eszköz működése (pl. a kesztyű rossz irányba rántja a kezet), hanem szabályos működés során is, mivel az erővisszacsatolt eszközök szabályozása során sokszor rezgések keletkeznek, amiknek hosszú távon lehet rossz hatása.

Ugyanebbe a kategóriába tartoznak azon komponensek, amelyekre oda kell figyelnünk a virtuálisvalóság-rendszerek kialakítása során. Nagyon fontos odafigyelni a kábelek, pányvák megfelelő elrendezésére, ill. fontos, hogy az egyes eszközök hol helyezkednek el. Sok baleset van amiatt, mert a rendszerek kialakítói erre sokszor nem figyelnek oda kellő mértékben. Ez különösen bemerüléses virtuálisvalóság-rendszereknél kritikus, ahol a valósággal minden kapcsolatunk megszűnt. Ilyen esetekben amúgy is nagyon fontos, hogy a felhasználó a látványban korlátozva legyen, a biztonságos tér határait valamilyen módon megjelenítsük számára (pl. félig áttetsző ráccsal jelezzük azt a határt, amin nem szabad kívül mennie).

Bőrbetegségek

Bőrbetegségek az ilyen megoldások során elsődlegesen a viselhető eszközöknél (HMD, kesztyűs alkalmazások) fordulhatnak elő. Az eszközök magas költsége miatt általában több felhasználó használja ugyanazt az eszközt. Ez különösen igaz olyan esetekben, ahol kiállításokon, trade show eseményeken mutatják be őket. Természetesen vannak megoldások annak csökkentésére, hogy a baktériumok megtelepedhessenek a kesztyűben: megfelelő anyagválasztás (pl. likra, amely baktériumtaszító hatású, szellőző anyag), minőségi formakialakítás (nagyon finom kialakítás, apró lyukak, üregek elkerülése). Ez jelentősen megnövelheti az eszköz árát, ugyanakkor nagyon szükséges.

7.2.2 Kiberbetegség

Virtuálisvalóság-rendszerekben előforduló leggyakoribb probléma a kiberbetegség valamilyen megnyilvánulása [Vinson et al. 2012]. Valójában sem a virtuális valóság természetét, sem az emberi szervezetet nem ismerjük eléggé, ezért kizárólag kísérleti és tapasztalati eredményekkel tudjuk alátámasztani az eredményeket.

A kiberbetegség két fő összetevője a tengeri betegség (nem koordinált mozgásból adódó szubjektív érzékelés), illetve a szimulációs betegség (a háromdimenziós megjelenítés hibái által okozott hibás érzékelés).

A kiberbetegség tipikus tünetei: a szem megerőltetése, tájékozódási zavar, testtartási instabilitás, izzadás, sápadtság, álmosság, szájszárazság, telítettségérzet, hányinger, hányás (ritka). A leggyakoribbak ezek közül látási (okulomotoros) zavarok, amely a felhasználók 78%-ában okoz problémát a kezdeti fázisban. További fontos következmények a hányinger (70%) és a tájékozódási zavar (67%). Ilyen esetben nagyon fontos megfelelő időben elhagyni a virtuális teret.

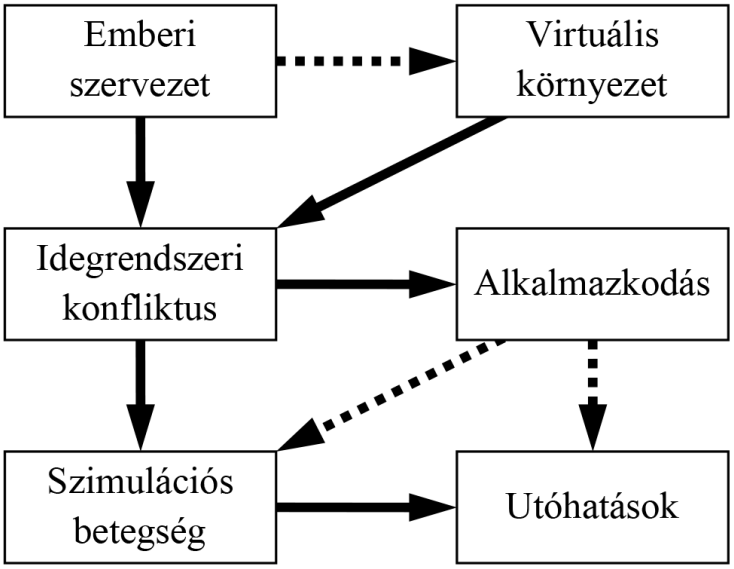
Idegrendszeri konfliktusok

Idegrendszeri konfliktus abban az esetben alakul ki, ha a felhasználó szenzoros csatornái nincsenek összehangolva (elsősorban technológiai korlátok miatt). Ezek közül legfontosabb az egyensúly-érzékelő szervünk (vesztibuláris rendszer) és a látás kapcsolatának hiánya: pl. a látvány mozog, de a felhasználó egy helyben ül, ezért az egyensúlyérzékelés nem jelez; ugyanez fordítva is előfordul. Ez a vezető oka a kiberbetegségek kialakulásának. Más érzékelési konfliktusok is okozhatnak ilyen gondot.

Hasonló a probléma, amikor a fejre szerelhető eszköz csak orientációt mér (esetleg vízszintes síkban mozgást) vagy mér pozíciót, de az orientációt csak részlegesen méri (pl. fejforgatást nem). Mivel a mozgásunk alapvetően teljes hat szabadságfokú, itt is idegrendszeri konfliktus alakulhat ki.

Fordított működésű a vekció (testillúzió). Ez azt jelenti, hogy a szervezetünk mozgásérzetet érez a virtuális világ (vagy egyszerű 3D-s megjelenítés) hatására annak ellenére, hogy a valóságban nem történik mozgás. Ez elsődlegesen nagy látóterű megjelenítők esetén fordul elő. Az ember idegrendszere elsődlegesen a látásra épít, konfliktus esetén annak hisz a többi érzékszerv jelzései ellenére. Ilyenkor előfordul, hogy a felhasználó elesik, mert az idegrendszere a mozgás ellen védekezik, ellenirányú erőt kifejtve.

Az idegrendszeri konfliktushoz vezető okokat az emberi agy képes valamilyen mértékben megtanulni [Burdea–Coiffet 2003], képes hozzájuk alkalmazkodni, ennek ellenére sokszor olyan utóhatások lehetnek, amiket az ember nem köt össze a bemerüléssel (7.1. ábra).



7.1. ábra: Idegrendszeri konfliktus
(Forrás: a szerző által készített ábra.)

Az idegrendszeri konfliktus természete nem ismert eléggé, mivel meglehetősen összetett problémakör. Az orvostudomány sokat foglalkozik vele.

Rendszerjellemzők szerepe

A szimulációs betegség kialakulásának leggyakoribb oka a megfelelő eszköz hiánya, ez ugyanis hibás látás–egyensúlyi kapcsolatot eredményez. Nagyon fontos, hogy olyan eszközt válasszunk, amely megfelelő paraméterekkel rendelkezik, ellenkező esetben a korábban ismertetett idegrendszeri konfliktus alakul ki, ami könnyedén rosszulléthez vezet.

Az egyik fontos szempont a megfelelő követőrendszer kiválasztása. Ennek szinte minden paraméterének (főként késleltetés és remegés) megfelelőnek kell lennie ahhoz, hogy ne alakulhasson ki kiberbetegség. Fontos azonban az is, hogy a teljes rendszer késleltetése ne nagyon haladja meg a 30 ms-ot. 100 ms összkésleltetés (vagyis a HMD jelentősen lemarad a mozgástól) már egyértelműen betegséghez vezet. Ekkora késleltetést a vesztibuláris-okuláris reflex (szemkövetés) már nem képes korrigálni, eredményeképpen nincs vizuális stabilitás, a szemizmok megfeszülnek, szemfáradtság, hányinger alakul ki.

Felhasználói különbségek

A kiberbetegség kialakulásának jellege és mértéke nagymértékben függ a felhasználó tulajdonságaitól és aktuális állapotától. A vizsgálatok alapján a legveszélyeztetettebb korosztály a 2–12 éves, illetve a 18 év körüli. A 25 éves kor körüli felhasználóknál feleakkora a betegségek kialakulásának esélye, mint egy 18 éves kor körüli fiatal esetén. Nemek szerinti megoszlásban a nők nagyságrendileg háromszor érzékenyebbek, mint a férfiak, és ez az érzékenység nagymértékben növekszik terhesség, illetve menstruáció során. A vizsgálatok alapján összességében elmondható, hogy a fokozott hormontevékenység rossz hatással van a bemerülés során elszenvedett tünetekre.

További romlást eredményez a különféle szerek használata. Orvosságok, alkohol és a drog is növeli a betegség kialakulásának esélyét. Számos betegség (pl. influenza) is elősegíti a rosszullétet a bemerülés során. A fáradtság szintén rontja a hatást.

Interaktivitás foka

Érdekes felismerés, hogy az interaktivitás mértéke is nagymértékben képes befolyásolni a bemerülés által keltett tüneteket. Sokkal nagyobb eséllyel jelentkezik a rosszullét olyan esetben, ha egy másik felhasználó (vagy egy számítógépes algoritmus) befolyásolja a virtuális valóság történéseit. Ugyanez a jelenség akkor, amikor egy gépjármű utasai rosszul lesznek egy rossz minőségű szerpentines úton, míg a vezetőben nem alakulnak ki a tünetek.

A túlzott interaktivitás is okozhat problémákat. Ennek leginkább az az oka, hogy a virtuálisvalóság-rendszerek valamilyen mértékű hibával jelenítik meg a környezetet és minél nagyobb az interaktivitás foka (minél több elemet érzékelünk), annál több lehet a hiba. Emiatt gyengébb képességű rendszerekben korlátozzák az aktivitást és a pozíció- és orientáció-visszacsatolás szabadságfokát csökkentik. Korábban már volt szó róla, hogy ez a korlátozás is problémát okoz, ugyanakkor nagyon rossz követőparaméterekhez képest ez még mindig egy jobb megoldás lehet.

Időbeli tényezők

A várakozásokkal ellentétben a virtuális térben töltött idő növeli a betegség kialakulásának esélyét. Háromórányi bent tartózkodás során nagyságrendileg 70%-kal nagyobb az esély a betegség kialakulására, mint egy óra után.

Azt viszont fontos tudni, hogy megfelelő szünetekkel, az alkalmak számának növekedésével a felhasználó szervezete egyre jobban alkalmazkodik a virtuális térhez, egyre tovább tud bent maradni.

7.2.3 Alkalmazkodás és utóhatások

Az ember szervezete nagymértékben képes alkalmazkodni számos tényezőhöz. Meg tudja tanulni, hogy a vesztibuláris rendszer tévedhet, adaptálódni tud ahhoz, hogyha az érzékszervek egymásnak ellentmondanak.

A tanulás leginkább úgy működik, hogy a felhasználó sokszor merül be a virtuális valóságba és egyre hosszabb időt tölt bent. Ennek során az érzékelőkre épülő motoros koordinációs rendszer (feladata a multimodális eltérések kompenzációja) a korábban abnormálisnak tekintett körülményeket normálisként tartja nyilván.

Ha a paraméterek állandók, az alkalmazkodás könnyebb. Az állandó paraméterek más szempontból is nagyon fontosak, akár közvetlenül is problémát okozhat a túl nagy változás bennük. Ha a rendszer összkésleltetése folyamatosan változik, a felhasználó nem képes hosszabb távon sem hozzászokni a rendszerhez.

Az alkalmazkodás nem csak a betegségre vonatkozik. A megváltozott szem-kéz koordinációt is képes megtanulni. (Ha valakinek alacsony dioptria mellett erős cilindert tartalmaz a szemüvege, könnyedén fel- és leveheti azt anélkül, hogy érdemi változást látna a térbeli elrendezésben, ami az optikai leképzést figyelembe véve nagyon meglepő). Ennek következménye, hogyha a fejre szerelhető megjelenítő vagy egy adatkesztyű pozíció-visszacsatolása nagymértékű állandó offsethibát tartalmaz (akár 10 cm!), nem fog problémát okozni a felhasználó számára.

Az alkalmazkodás természetesen kétirányú. Ha hosszabb ideig nem használja az ember a virtuális teret bemerülésre, a megtanult érzékelések elvesznek, újra kell őket tanulni. A kihagyás mértékétől függően ez lehet rövidebb, mint az eredeti betanulás, de több év alatt akár teljes mértékben elveszítheti a szervezet az adaptációt.

7.3 Helyes virtuálisvalóság-használat

A virtuálisvalóság-rendszerek helyes használatát szét kell bontanunk szakaszokra és nagyon fontos, hogy ezekben a szakaszokban betartsuk az alapvető szabályokat. Az alábbiakban a fontosabbakat foglaljuk össze felsorolásszerűen. Ezek természetesen az első bemerülési alkalmak során a legfontosabbak.

Rendszertechnika

- Késleltetés minimalizálása és stabilan tartása.
- Alacsony frekvenciás pulzáló fényforrások kerülése.
- Nagy méretű kijelzőkön a képfrekvenciák csökkentése.
- HMD: jól beállított optika, jó felbontás.
- Nagy erejű 3D-s hangforrás intenzitásának korlátozása (erőben és időben).
- Pontos követők, interferencia megszüntetése.
- Többmódusú megjelenítés esetén konzisztencia megtartása.

Bemerülés előtt

- Megkérdezni, hogy a felhasználók érzékenyek-e kiberbetegségre.
- Figyelmeztető címkék elhelyezése és szóbeli oktatás a lehetséges hatásokról.
- Csak alkohol és egyéb szerektől mentes embereket engedni.
- Felhívni a figyelmet a felhasználóknak, hogy jól kipihenten érkezzenek.
- Nem szabad felhasználókat beengedni különféle betegségek esetén: megfázás, influenza, binokuláris anomáliák; migrénre vagy fénnyel szembeni érzékenységre való hajlam.

Bemerülés alatt

- Megfelelő légáramlás és kellemes levegő hőmérséklet (ha lehet, 21-22 °C alatt).
- Az eszközök kényelmesen illeszkedjenek a felhasználóhoz (legyen állítható pl. a szemközti távolság)
- Az első bemerülés legyen rövid, különösen, ha erős az ingerlés (10 perc, vagy kevesebb).
- Figyelni a felhasználókat, hogy nem jelentkeznek-e a kiberbetegség tünetei.
- Elmondani a felhasználóknak, hogy bármikor abbahagyhatják, amikor szeretnék, és felhívni a figyelmüket, hogy hagyják is abba, ha a tüneteket érzik.

Bemerülés után

- Ellenőrizni a felhasználók kéz-szem koordinációját és testi stabilitását.
- A felhasználó nem végezhet közvetlenül a bemerülés után veszélyes tevékenységet (vezetés, biciklizés stb.).
- Számos esetben szükség lehet az újra bemerülésre.
- Ismételt találkozásra lehet szükség az elnyújtott utóhatások vizsgálatára.
- Érdemes 3-5 napot kihagyni a következő alkalom előtt.

7.4 Társadalmi hatások

A virtuálisvalóság-rendszereknek számos erőteljes hatása van a társadalomra nézve. Ezek egy része pozitív hatás, más része viszont negatív.

7.4.1 Hátrányok

Nagyon fontos megemlíteni a virtuálisvalóság-rendszerek addiktív hatását (egyfajta drog). A korábbi évtizedekben hasonló szerepe volt egy időben a televíziónak, amit felváltott az internet, illetve később a közösségi oldalak és a mobiltelefon. A virtuális valóság nagymértékben képes elszakítani a felhasználót a valós világtól, ezért ez a hatás sokkal erőteljesebb tud lenni. Társadalmi szinten ez egyelőre nem mérhető, egyéni szinteken azonban a hatás jól megmutatkozik. Ha kritikus pontot érne el az ilyen rendszerek nem megfelelő használata, az társadalmi szinten is komoly problémákat vethetne fel. Ennek egyelőre gátat szabnak a magas költségek, illetve az, hogy az emberek nem szeretnek a fejükön/szemükön/kezükön viselni idegen eszközöket.

Ugyanide tartozik, hogy a virtuális tér hajlamossá tesz az egyének izolációjára a társadalomtól. Ez a számítógépes játékok világában már ismert jelenség, a két tevékenység sokszor összekapcsolódik.

Hasonlóan az online közösségi felületekhez, a virtuális rendszerekre hatványozottan igaz az, hogy a felhasználóban hamis kép alakulhat ki magáról, illetve arról, hogy mekkora erőfeszítést kell kifejtenie ahhoz, hogy valamit megkapjon. Ez egyértelműen oda vezethet, hogy képtelen a tanulásra, az olyan információk befogadására, amit közvetetten tud felhasználni („halat tud csak elfogadni, azt nem, hogyan kell halászni”). Ez szintén olyan pont, amit az oktatók már ismernek.

7.4.2 Előnyök

A hátrányok mellett azonban számos előnye is van az ilyen rendszereknek. Elsősorban a szakmai életben használhatók, bár a magánéletben is lehet nagy haszna.

A magánéletben elsődlegesen az orvostudomány használhatja megfelelően. Számos sikeres eredmény mutatja, hogy fóbiák, szorongások kezelésére kiváló lehetőség, de más fajta betegségek során is segíthet terápiás és rehabilitációs feladatokban. Nagyfokú égési sérülések esetén hatékony fájdalomcsillapítást lehet elérni azáltal, hogy egy „hideg”, havas virtuális térben merül el a felhasználó.

Sokkal több előny jelenik meg azonban a szakmai élet számos területén: tanítás, tervezés, analízis, megvalósítás, kommunikáció stb. Nagyon sok alkalmazási területe van az olajipar, hadiipar, távközlés, gépjárműipar, gyártástechnológia, robotika, információ-vizualizáció és az orvosi kutatások terén stb.

Fontos külön kiemelni az erőteljesebb interakciót távoli kapcsolatok esetén, szerepét a csoportmunkák hatékonyságában. Segítségével sokszor elkerülhetők hosszú utazások, csökken az utazási stressz, az alkalmazottak többet tölthetnek családjukkal. Ilyen jellegű rendszerek nélkül sok esetben elkerülhetetlen a helyszínre utazás, de a virtuális valóság lehetővé tesz távoli kooperációt és kollaborációt (ez utóbbi esetben akár ugyanazon a virtuális eszközön közösen dolgozhatnak távoli felek).

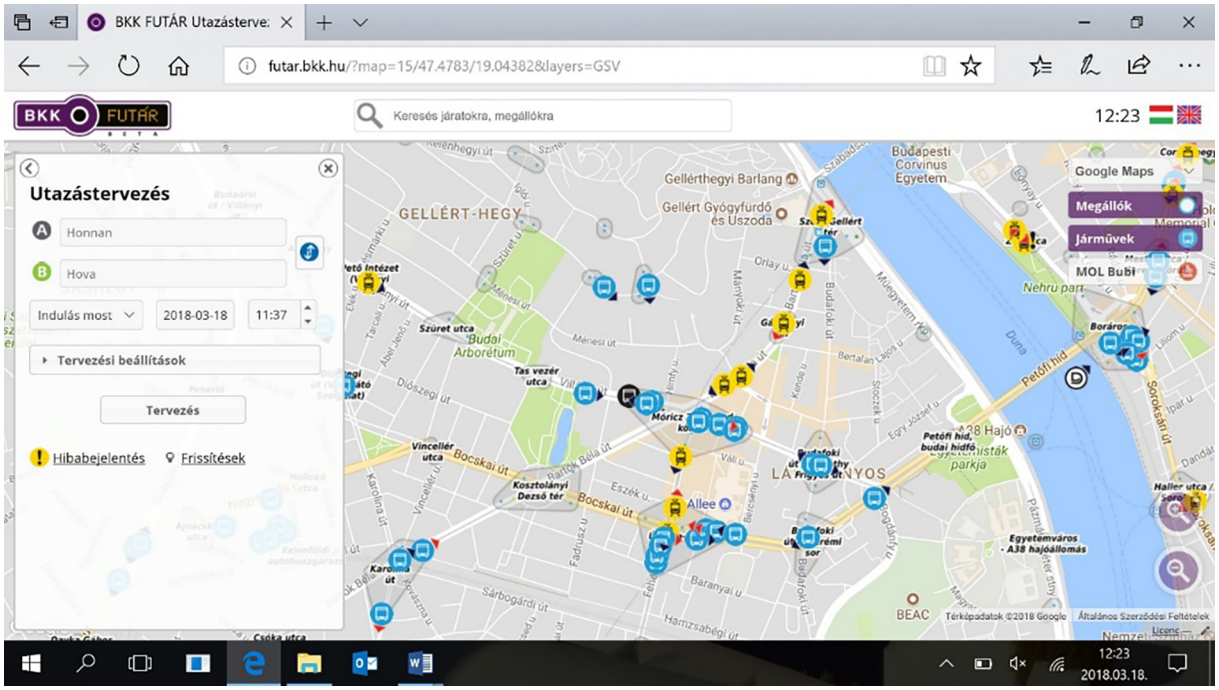
8. TARTALOMMEGJELENÍTÉS A KÖZIGAZGATÁSBAN

8.1 Jelenlegi helyzet

Először tekintsük át, hogy milyen információkra van szükségünk hétköznapjaink során és azt is, hogy ezekhez az információkhoz jelenleg hogyan jutunk hozzá. Az információkat az alábbiak szerint csoportosítjuk:

- közlekedés;
- szolgáltatás, ügyintézés;
- egészségügy.

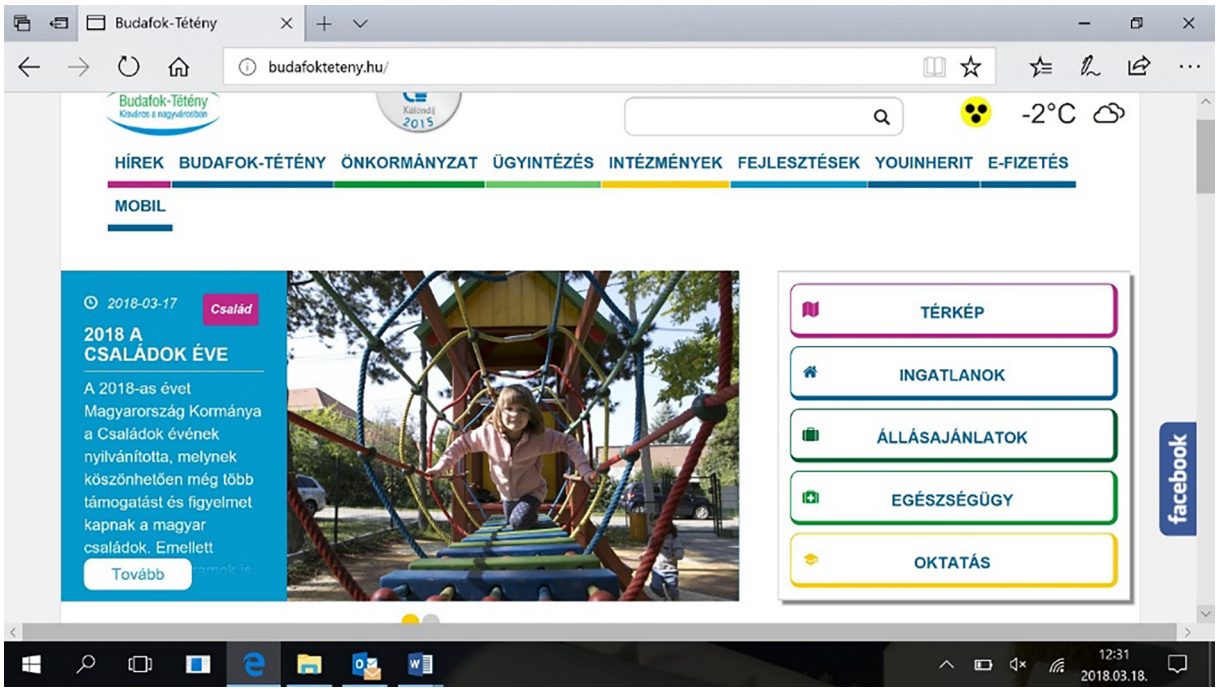
Közlekedési információkhoz, forgalmi adatokhoz elsősorban a www.google.hu/maps, illetve a www.waze.com/hu/livemap oldalakon juthatunk. Mindkét oldal tartalmaz folyamatosan frissülő forgalmi információkat és útvonaltervezőt is. Ezek meglehetősen általánosan felhasznált alkalmazások, ezért ismertetésüktől most eltekintünk.



8.1. ábra: A BKK Futár oldala
(Forrás: futar.bkk.hu.)

A BKK Futár közlekedési és járatinformációk segítségével valós időben követhetjük nyomon a tömegközlekedési járműveket, minden járatról pontos információkat találhatunk az oldalon (8.1. ábra). Meg kell jegyezni, hogy a Google Maps is tud tömegközlekedés felhasználásával útvonalat tervezni, menetrendi adatok alapján. Ezeket az adatokat kiegészítheti az ORFK Rutin nevű mobiltelefon alkalmazása (https://play.google.com/

store/apps/details?id=hu.police.orfk.rutin&hl=hu). A RUTIN balesetekről, egyéb közúti eseményekről, és az ezekkel kapcsolatos forgalomkorlátozásokról nyújt információt a felhasználók számára. Szolgáltatásokkal, ügyintézési lehetőségekkel kapcsolatban az önkormányzatok honlapjaihoz fordulhatunk. Példaképpen itt a XXII. kerület oldalára hivatkozunk (http://budafokteteny.hu/) (8.2. ábra).

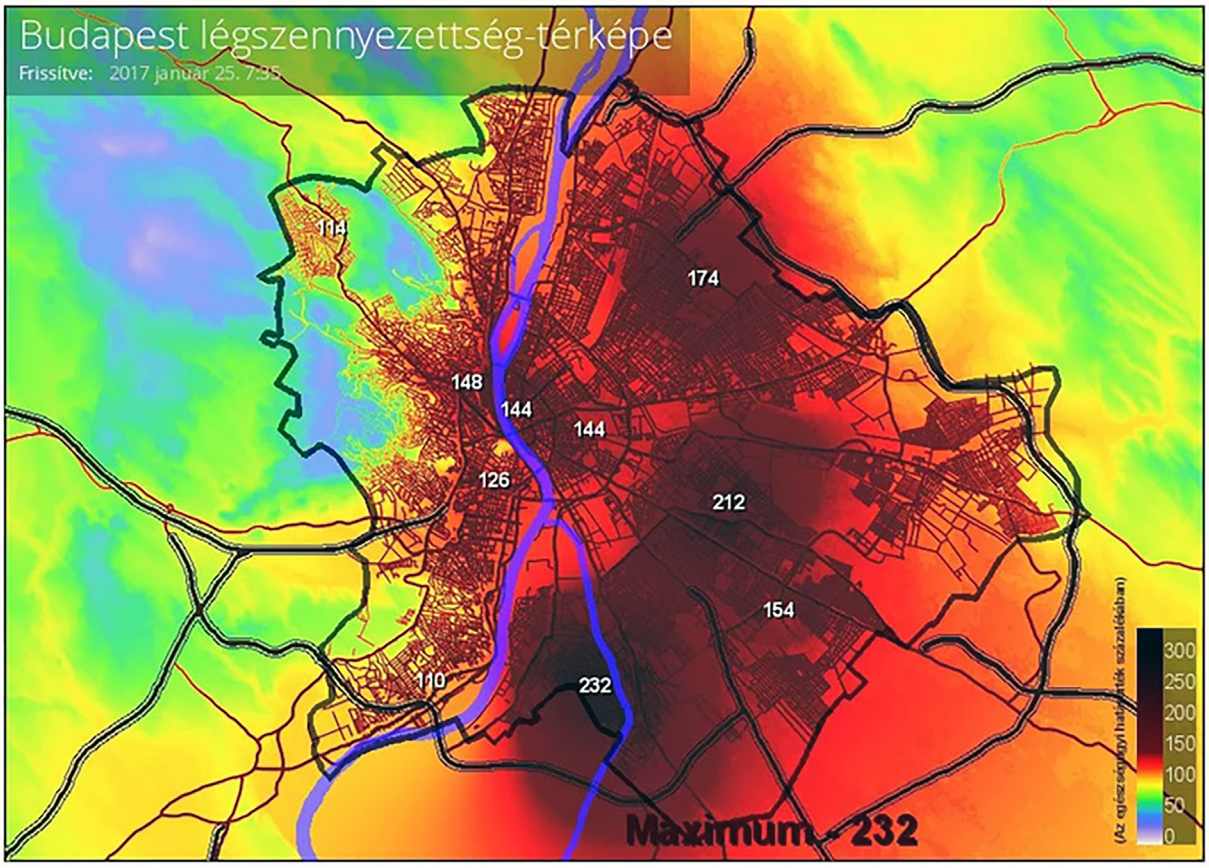


8.2. ábra: A XXII. kerületi önkormányzat honlapja
(Forrás: budafokteteny.hu.)

Meg kell jegyezni, hogy a honlap viszonylag jól szerkesztett, kerüli a túlzsúfolt és nehezen áttekinthető tartalmakat, az egészségügy fül alatt valóban releváns adatokat találunk orvosi rendelőkről, rendelési idejükről. Érdekesség, ha részletesebb információkat szeretnénk, akkor a http://ittlakunk.hu/ oldalra kell mennünk, ahol kerületi bontásban, például a XXII. kerületi adatokat a http://22.kerulet.ittlakunk.hu/holmi/legfontosabbak/xxii-keruleti-orvosi-ugyelet linken találjuk. Az oldal nem önkormányzati kezelésben van és piaci alapon működik. Az időjárási értékek és előrejelzések számos helyen hozzáférhetőek. Az egészségügy vonatkozásában fontosak a légszennyezettségi adatok, aminek folyamatosan aktualizált térképe a https://www.idokep.hu/szmog oldalon található. Jellemzőként lássuk a 8.3. ábrán a 2017. január 25-e reggeli szálló por adatokat Budapest térképén. Ekkor szmogriadó volt érvényben, jelentős forgalomkorlátozásokkal.

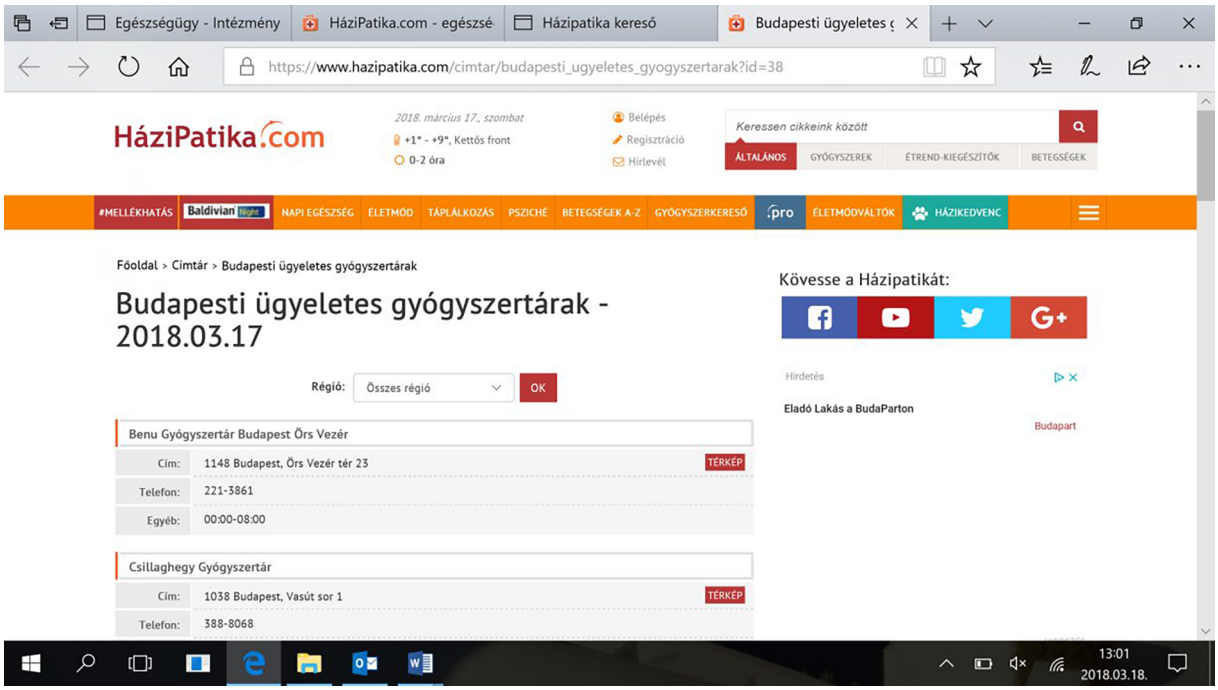
A Fővárosi Kéményseprőipari Kft. adatai szerint 2016-ban 52 284 darab szilárd tüzelésű (fa-, szén-, olaj- és vegyes tüzelésű) egyedi kémény volt a fővárosban.

Összehasonlítva Koppenhágában, a dán fővárosban, 16 ezer szilárd tüzelésű háztartás van, és ezek a kémények Koppenhága szállóporszennyezésének 30 százalékáért felelősek. Ebből kiindulva Budapesten a jelenlegi szmog 30-50 százalékát is okozhatja a fűtés. Jól látszik a térképen, hogy a szmogszennyezés nem feltétlenül a nagyon forgalmas területekre koncentrálódik, ezért a légszennyezés csökkentésének sem nagyon hatékony módszere Budapesten a forgalom korlátozása. Ez vidéki településekre is igaz, ahol a légszennyezés folyamatos mérése és monitoringja még csak nem is megoldott.



8.3. ábra: Budapest szálló por (szmog) légszennyezettség térképe, 2017. január 25-én reggel (Forrás: idokep.hu.)

A napi használatú értékes adatok mennyisége és minősége szinte tetszőleges számban bővíthető. Néhány példa: parkolóhelyek telítettsége, utcai parkolók foglaltsága, várakozási idők benzinkút, autómosó, bank és ügyfélszolgálatok körében. Ezek az információk az egyes szolgáltatóknál, illetve akár piaci alapon készülő, felhasználói forgalomból élő internetes oldalakon fokozatosan elérhetők lesznek. Nem látszik azonban, hogyan lehetne ezeket az adatokat olyan integrált, egységes platformba építeni, ahol mind a hozzáférésük, mind pedig hiteles és megbízható tartalmuk is biztosítható lenne. Például az ügyeletes gyógyszertárak legjobb aktuális összefoglalása a www.hazipatika.com oldalon érhető el (8.4. ábra).



8.4. ábra: Budapesti ügyeletes gyógyszertárak
(Forrás: hazipatika.com.)

8.2 Igények, kihívások, alkalmazási lehetőségek

A tartalommegjelenítést egészen általánosan értelmezve, és beleértve valamennyi szóba jöhető módszert és technikát, technológiát, be kell látnunk, hogy a digitalizáció minden területen szinte egyeduralkodóvá válik. Akár szimpatizálunk vele, akár nem, az új generációk életéből eltűnnek a nyomtatott könyvek, egyetemi jegyzetek és újságok. A tv- és rádióadások a közeljövőben átkerülnek az internetre, az órákon, az egyetemi előadásokon a hagyományos krétát és táblát a digitális, okos táblára cseréljük, miközben az órák interaktivitását, a hallgatók aktív közreműködését is már okos eszközökön, táblagépeken vagy mobiltelefonokon keresztük érjük el. Ezek a változások nem csak a felszínen, az eszközök tekintetében jelennek meg, hanem teljesen új megközelítést is igényelnek a tartalomszolgáltatások és ezen belül az oktatás tekintetében is. Nehezen megkülönböztethetővé válik a hagyományos nappali és levelező képzés, hiszen az e-learning módszerek beépülnek a nappali oktatásba, míg a gyakorlati képzésben komoly szerepet kaphatnak a 2D-s és 3D-s videoalkalmazások, a kiterjesztett- és virtuálisvalóság-technikák. Itt nem csak a pilótaképzésben használt repülőgép-szimulátorokra kell gondolnunk, a módszer a mérnökképzésben szükséges laborgyakorlatra felkészülésben is látványos és hatékony eszköz lehet. Nincs persze arról szó, hogy forrasztani vagy pipettával, lombikkal bánni, ilyen területeken gyakorlatot szerezni kizárólag YouTube-videók segítségével lehetséges, de a felkészülésben, a folyamatok megértésében a digitális technológiák lényegesen lerövidíthetik a tanuláshoz, a készségek elsajátításához szükséges időt.

A következő időszak legnagyobb kihívása részben az, hogy az ilyen típusú digitális tartalmak előállítása igen erőforrás-igényes, ezek 3D-s vagy akár kiterjesztett és virtuális valósággal történő kiegészítése további nehézséget jelent. Ráadásul ezeken a területeken további komoly kutató- és fejlesztőmunkára is szükség lesz, a jelenleg hétköznapi szinten elérhető alkalmazások kiforratlanok, kezdetlegesek, használatuk akár a hétköznapi, akár a városi életben, a közigazgatásban korlátozott. A lehetőségek nagyok, sokak szerint szinte korlátlanok.

A hazai tapasztalatokkal és eredményekkel kapcsolatban meg kell említenünk a Széchenyi István Egyetem Virtuális Laboratóriumában folyó kutatómunkát [Berki 2018], [Lampert et al. 2018], [Horvath – Sudar 2018].

9. ÖSSZEFOGLALÁS

A fentieket összefoglalva megállapíthatjuk, hogy még sok feladat van hátra, hogy a virtuális- és kiterjesztettvalóság-rendszerek nagymértékben elterjedhessenek, látszódnak már azonban ennek jelei. Az utóbbi években egyre több pénzt fektetnek bele a nagyobb cégek, a virtuálisvalóság-rendszerek egyszerűbb komponensei már szinte mindenki számára elérhetők.

A dokumentumban részletesen bemutattuk a virtuálisvalóság-környezetben használatos legfontosabb eszközöket és megoldásokat, ismertettük azok előnyeit és hátrányait. Ezekből jól látszanak a jövő irányvonalai és a megvalósítandó hiányok. Részletesen foglalkoztunk azonban azzal is, hogy mire kell odafigyelnünk, hogy megfelelően használjuk a virtuálisvalóság-rendszereket, hogy a társadalmi kihívásoknak megfeleljünk.

A monográfiában megpróbáltunk megoldásokat kínálni a közigazgatás területén folyamatosan növekedő feldolgozandó adatmennyiség problémáira, valamint az e területen dolgozók feladatának egyszerűsítésére, a hatékonyság növelésére, illetve rávilágítani azokra a problémákra, amelyek rövidebb vagy hosszabb távon gondokat okozhatnak.

10. IRODALOMJEGYZÉK

{1} Atal, B. – Schroeder, M. (1962): Apparent sound source translator, Patent US. 3236949A.

{2} Bashashati, A. – Fatourechi M. – Ward R. K. – Birch. G. E. (2007): A survey of signal processing algorithms in brain–computer interfaces based on electrical brain signals, Journal of Neural Engineering, Volume 4, No 2, R32-57, March 2007.

{3} Berki B (2018): 2D Advertising in 3D Virtual Spaces, Acta Polytechnica Hungarica, Volume 15, Issue Number 3, DOI: 10.12700/APH.15.3.2018.3.10

{4} Bilinski P., Ahrens J., Thomas M., Tashev I., Platt J. (2014): HRTF Magnitude Synthesis Via Sparse Representation of Anthropometric Features, IEEE ICASSP, pp. 4468–4472, Florence, Italy.

{5} Brown M. (2016): Exploring the magic behind the HTC Vive controller, https://www.vrheads.com/exposing-magic-behind-htc-vive-controller, 28 July 2016.

{6} Burdea G. C. – Coiffet P. (2003): Virtual Reality Technology, John Wiley & Sons, USA,

{7} Davison A. (2007): The P5 Glove. In: Pro Java™ 6 3D Game Development., Apress, USA

{8} Fatourechi M. – Bashashati A. – Ward R. K. – Birch. G. E. (2007): EMG and EOG artifacts in brain computer interface systems: A survey, Elsevier, Clinical Neurophysiology, Volume 118, No 3, pp. 480–494, March 2007.

{9} Horvath I – Sudar A (2018): Factors Contributing to the Enhanced Performance of the MaxWhere 3D VR Platform in the Distribution of Digital Information, Acta Polytechnica Hungarica, Volume 15, Issue Number 3, DOI: 10.12700/APH.15.3.2018.3.9

{10} Ickes B. P. (1970): A new method for performing digital control system attitude computations using quaternions., AIAA Journal, Volume 8, No 1, pp. 13–17, Jan 1970.

{11} Krevelen D. W. F. van – Poelman R. (2010): A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations., The International Journal of Virtual Reality, Volume 9, No 2, pp. 1–20, 2010.

{12} Lacoche J., Duval T., Arnaldi B., Maisel E., Royan J. (2014): A survey of plasticity in 3D user interfaces, 7th Workshop on Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems, March 2014, Minneapolis, United States. IEEE, pp.8, 2014. https://hal.inria.fr/hal-00974015/document

{13} Lampert B – Pongracz A – Sipos J – Vehrer A – Horvath I (2018): MaxWhere VR-Learning Improves Effectiveness over Clasiccal Tools of e-learning, Acta Polytechnica Hungarica, Volume 15, Issue Number 3. DOI: 10.12700/APH.15.3.2018.3.8

{14} Lun R. – Zhao W. (2015): A Survey of Applications and Human Motion Recognition with Microsoft Kinect, International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 29 May 2015, pp. 1–48. https://engagedscholarship.csuohio.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1417&context=enece_facpub

{15} MacLachlan R. A. – Parody N. – Mukherjee S. – Hollis R. L. – Riviere C. N. – Martel J. N. – Lobes L. A. (2016): Electromagnetic tracker for active handheld robotic systems, IEEE SENSORS, 30 Oct. –3 Nov. 2016, Orlando, FL, USA.

{16} Madgwick S. O. H – Harrison A. J. L. – Vaidyanathan R. (2011): Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm, 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Rehab Week Zurich, ETH Zurich Science City, Switzerland, 29 June – 1 July, 2011. https://pdfs.semanticscholar.org/7fa5/eebe34cd2efc0b48eb60fb62fbd0bb5f33ba.pdf

{17} Mitra S. – Acharya T. (2007): Gesture recognition: A survey, IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, Volume 37, No 3, pp. 311 - 324, May 2007.

{18} Raskin J. (2000): The humane interface: new directions for designing interactive systems, Addison–Wesley, USA.

{19} Rolland J. P. – Baillot Y. – Goon A. A. (2001): A Survey of Tracking Technology for Virtual Environments, in Book „Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality", Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, London, United Kingdom.

{20} Salisbury K. – Conti F. – Barbagli F. (2004): Haptic Rendering: Introductory Concepts, IEEE Computer Graphics and Applications, Volume 24, No 2, pp 24–32, March 2004.

{21} Starch. D. (1908): Perimetry of the Localization of Sound ..., The Psychological Review: Monograph Supplements, Volume 6, No 5, pp. 1–45. State University of Iowa.

{22} Szemenyei M. – Vajda F. (2017): Dimension Reduction for Objects Composed of Vector Sets, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Volume 27, No 1, pp. 169–180.

{23} Ullmer B. – Ishii H. (2000): Emerging frameworks for tangible user interfaces, IBM Systems Journal Volume 39, No 3–4, pp. 915–931.

{24} Vinson N.G. – Lapointe J-F. – Parush A. – Roberts S. (2012): Cybersickness Induced by Desktop Virtual Reality, Graphics Interface Conference, pp. 69-75, Toronto, Ontario, Canada, 28–30 May 2012. https://www.researchgate.net/profile/Avi_Parush/publication/256249121_Cybersickness_induced_by_desktop_virtual_reality/links/54759cfe0cf2778985aee943/Cybersickness-induced-by-desktop-virtual-reality.pdf

{25} Wærsted M. – Hanvold T. –Veiersted K. (2010): Computer work and musculoskeletal disorders of the neck and upper extremity: A systematic review, BMC Musculoskeletal Disorders, pp. 11–79.

{26} Wolfgang F. – Jürgen R., Jan K. – Haw. H. (2010): A System-On-Chip Platform for HRTF-Based Realtime Spatial Audio Rendering., The Second International Conference on Creative Content Technologies, pp. 45–50, https://www.thinkmind.org/download.php?articleid=content_2010_2_30_60017

A Nemzeti Közszolgálati Egyetem kiadványa

Kiadó:

Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Közigazgatási Továbbképzési Intézet
www.uni-nke.hu

Felelős kiadó:
Prof. Dr. Kis Norbert rektorhelyettes
Címe: 1083 Budapest, Üllői út 82.

Olvasószerkesztő:
Kiss Eszter

Tördelőszerkesztő:
Friebert Máté

ISBN 978-963-498-121-3 (elektronikus)