



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VILLAMOSMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
IRÁNYÍTÁSTECHNIKA ÉS INFORMATIKA TANSZÉK

Tekintetkövető rendszer fejlesztése képfeldolgozási alapokon

DIPLOMATERV

Készítette
Kovács Balázs

Konzulens
Kertész Zsolt

2013. május 10.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	I
Hallgatói nyilatkozat	III
Kivonat	IV
Abstract	V
Bevezető	1
1. Felhasználási lehetőségek	2
1.1. Kutatási felhasználás	2
1.1.1. Kognitív pszichológia	2
1.1.2. Érzelmedetektálás	2
1.1.3. Orvosi felhasználás	3
1.2. Gyakorlati felhasználás	3
1.2.1. Webergonómia	3
1.2.2. Vezetésbiztonság	3
1.3. Összefoglalás	3
2. A tekintetkövetésről	4
2.1. Tekintetkövetési módszerek	4
2.1.1. Az ideális tekintetkövető	4
2.1.2. Optikai elvű követés	6
2.1.3. Elektromos potenciál-alapú követés	8
2.1.4. Követés speciális kontaktlencse használatával	8
2.1.5. A tekintetkövetési módszerek összehasonlítása	9
2.2. Szemmozgások	9
2.2.1. Szakkádok	10
2.2.2. Lassú követések	11
2.2.3. Fixációk	11
2.2.4. Nystagmus	12
2.2.5. Összegzés	12
2.3. Optikai megfontolások	12
3. Elméleti alapok	14
3.1. Hough-transzformáció	14
3.1.1. Egyenesek keresése	15

3.1.2. Körkeresés	18
3.1.3. Kiegészítések	20
3.1.4. Összegzés	22
3.2. Objektumdetektálás és -követés	23
3.2.1. A Viola–Jones objektumdetektor	23
3.2.2. A Lucas–Kanade optikai áramlás eljárás	23
3.2.3. Összegzés	25
3.3. Blob-műveletek	26
3.3.1. Komponens-címkézés	26
3.3.2. Blob-analizis	29
3.3.3. Összegzés	30
4. Technológia	31
4.1. Az OpenCV könyvtár	31
4.2. A Qt keretrendszer	34
4.2.1. A Qt Creator fejlesztői környezet	36
4.3. Módosított kamera	36
5. Kísérlet	37
5.1. Módszerek összehasonlítása	37
5.2. Feldolgozási folyamat	37
5.2.1. Pupillakövetés	37
5.2.2. Kalibráció, leképezés	37
5.3. Kísérletek	37
5.3.1. Pszichológiai bemutató	37
5.3.2. Webergonómiai bemutató	39
5.4. Összefoglalás	40
6. Megvalósítás	41
6.1. Architektúra	41
6.1.1. A Class1 osztaly	41
6.1.2. A Class2 osztaly	41
6.1.3. A Class3 osztaly	41
6.2. Felhasználói felület	41
6.3. Felhasználói dokumentáció	41
6.4. Tesztelés, eredmények	41
Értékelés	42
Köszönetnyilvánítás	43
Irodalomjegyzék	44
Függelék	46
F.1. Mellékletek	46
F.2. Telepítés	46

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott *Kovács Balázs*, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy autentikált felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelté után válik hozzáférhetővé.

Budapest, 2013. május 10.

Kovács Balázs
hallgató

Kivonat

Jelen dokumentum egy a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Irányítástechnika és Informatika Tanszékén készített diplomaterv „*Tekintetkövető rendszer fejlesztése képfeldolgozási alapokon*” témában.

Abstract

The current paper is a thesis from Department of Control Engineering and Information Technology at Budapest University of Technology and Economics in the topic of „*Development of a Gaze Tracking System Based on Image Processing*”.

Bevezető

*Hová merült el szép szemed világa?
Mi az, mit kétes távolban keres?*

...

Tekintetkövető rendszer fejlesztése összetett feladat. A probléma mind magas, mind alacsony absztrakciós szintről megközelítve megfelelő szakmai felkészültséget követel meg: a rendszer megtervezéséhez, összeállításához és implementációjához olyan önálló mérnöki munka szükséges, ami a ideálissá tette számomra a feladatot diplomatervem témájaként. Nem mellesleg az elkészült rendszer remélhetőleg sok hasznos kutatási vagy ipari felhasználásban bizonyulhat hasznosnak.

+++ meg 1-2 bekezdes szoveg +++

+++ melyik fejezetben mi van +++

1. fejezet

Felhasználási lehetőségek

A tekintet megfelelő minőségű és robusztus követésének számos gyakorlati felhasználása lehetséges. Elég csak a *perceptuális* (észlelési), vagy *kognitív* (megértési) kutatási területekre gondolni, ahol például az olvasás, vagy az olvasási folyamatának vizsgálatánál bizonyulhat hasznosnak.

+++ kicsit hosszabb bevezető, meg kepek a fejezetbe mert nagyon szaraz
+++

1.1. Kutatási felhasználás

1.1.1. Kognitív pszichológia

Olvasási folyamatok terén a szakkádok gyors és pontos követése válhat lehetővé, amely a kognitív folyamatok elemzésében komoly segítséget nyújthat. Alvásvizsgálat terén leginkább – nevéből adódóan – a REM (Rapid Eye Movement) fázis kötődik a szemmozgás követéséhez, ebben az alkalmazásban azonban értelemszerűen optikai elvű követés nem jöhét szóba.

1.1.2. Érzelmedetektálás

A pupillaátmérő nem csak a fénymennyiség-változás hatására módosulhat. Érzelmi, izgalmi állapotok is előidézőik a változást, mint például félelem, idegesség vagy örööm [1]. Ez a jelenség szintén potenciális felhasználási lehetőségeket rejti magában. Mivel a pupillareflex akaratlagosan nem koordinálható, állandó fénymennyiség mellett a pupillaméret változásának figyelésével detektálható válnak a fent említett érzelmi állapotok. Ehhez a változás mértékének és sebességének pontos mérése szükséges, ami azonban kellően nagy sebességű kamerával és elfogadható számítási teljesítményt nyújtó hardverrel kielégítő minőségben megtehető lehet. Az alkalmazás ráadásul nem feltétlenül igényli a szem közvetlen közelről (például fejre erősített kamerával) történő felvételét. Megfelelően nagy felbontású forrás esetén az arc-, majd szemrégió automatikus szegmentálása után a felismert zónát felhasználva, akár távolról is történhet a pupillareflex vizsgálata.

1.1.3. Orvosi felhasználás

Egyes betegségek is okozhatják a pupilla rendellenes méretét vagy viselkedését. Például a „miosis”, azaz a szem összehúzódása nemcsak a fent említett okokra vezethető vissza. Rendellenes összehúzódás alakulhat ki bonyos patológiai állapotok, gyógyszerek, vagy mérgek hatására, sőt a mikrohullámú sugárzásnak kitett szervezet is produkálja ezt a tünetet. A „mydriasis” (a pupilla tágulása) során ugyancsak nem megszokott viselkedés alakulhat ki bonyos gyógyszerek vagy kábítószerek használatkor, de akár komoly fizikai trauma hatására is a normálisnál jelentősebb mértékű vagy időtartamú lehet a pupilla tágulata. A két szem eltérő méretű pupillája (az „anisocoria”) olyan betegségek meglétét jelezheti, mint a Horner-, vagy az Adieszindróma [1]. Orvosi szempontból is van tehát mit vizsgálni: a pupilla követésével egyes betegségek, állapotok felismerése, vagy alakulásuk megfigyelése laikus és orvos számára is automatizálható, megkönyíthető lehet.

Továbbra is orvosi területen maradva a szemmozgás követése és regisztrálása *ontoneuroológiai* vizsgálatokban is szerepet kaphat. Az ilyen vizsgálat célja az egyensúlyszerv működésének megfigyelése és értékelése. Az összetett vizsgálat egyes fázisaiban a szemmozgások követése fontos információt hordoz az alany állapotáról, ugyanis a szemmozgató és az egyensúlyi információkat szállító idegpályák szoros kapcsolatban állnak egymással.

1.2. Gyakorlati felhasználás

1.2.1. Webergonómia

Ugyancsak felkapott kutatási terület manapság a *webergonómia* területe. Kellően pontos követéssel vizsgálható lehet, hogy a dizájnereknek mennyire sikerült a felhasználók igényeinek megfelelő felületet alkotniuk: könnyen eligazodnak-e rajta, esetleg idejük nagy részét a rossz tervezés következtében kaotikus bolyongással töltik.

+++ meg 1-2 bekezdes +++

1.2.2. Vezetésbiztonság

Vezetésbiztonsági alkalmazásban is elképzelhető lehet a pupillakövetés alkalmazása. A követés során mintegy járulékos információként mérhetjük a pislogások gyakoriságát és hosszát, ezzel felismerhetővé válhat a gépjárművezetés közben lankadó figyelme, és jelezhető, ha fennáll az elalvás veszélye. Az eljárás így hasznosnak bizonyulhat már meglévő elalvásdetektálási módszerek [2] kiegészítéseként, tovább javítva azok megbízhatóságát.

+++ meg 1-2 bekezdes +++

1.3. Összefoglalás

+++ par mondatos osszefoglalas +++

2. fejezet

A tekintetkövetésről

A tekintetkövető rendszer fejlesztésének megkezdése előtt számos elméleti és gyakorlati szempont veendő figyelembe, hogy a rendszer által nyújtott kritériumok a lehető legjobban közelítsék az elvártat. Nem kerülhető meg az általános technikák, vagy már meglévő megoldások áttekintése a szakirodalomból, aminek segítségével képet alkothatunk a kutatási téma jelenlegi állásáról, és a gyakorlati szempontok figyelembe vételével döntethetjük el, hogy mely módszer mellett tesszük le végül a vokszunkat.

A fejezet 2.1. szakaszában mindenekelőtt a jelenleg elérhető tekintetkövetési módszereket veszem górcső alá, majd hasonlítom össze őket, hogy kellően megalapozott döntést hozhassak a később felhasználni kívánt technikával kapcsolatban.

2.1. Tekintetkövetési módszerek

Bár már lassan másfél évtizedes, a témaiban mégis hiánypótló munka Arne John Glenstrupnak és Theo Engell-Nielsennek, a dán Københavns Universitet (Københágai Egyetem) hallgatóinak diplomamunkája [3]. Dolgozatuk jelen szempontból fontos második fejezetét a modern tekintetkövetési technikák bemutatásának és összehasonlításának szentelik, meglátásaik pedig mind a mai napig helytállóak.

Ebben a szakaszban főleg az ő munkájuk alapján szeretném összefoglalni a tekintet követésére felhasználható technikákat, néhol a lényeg kiemelésével, ahol pedig szükséges, a hivatkozott cikk keletkezése óta az idő műlásával érvénytelenné vált adatok, paraméterek aktualizálásával.

2.1.1. Az ideális tekintetkövető

Manapság számos módszer kínálkozik a tekintet követésére. De mégis milyen követelményeket kell teljesíteni az „ideális” tekintetkövetőnek? Scott és Findlay 1993-as munkájukban [4] Hallett eredményeit [5] figyelembe véve meghatározták az ideális tekintetkövető eszköz (vagy rendszer) paramétereit és tulajdonságait.

Ezek szerint az ideális tekintetkövető eszköznek a következő 12 pont által támasztott követelményeket kell teljesítenie:

- a. az arc és a fejrégió könnyen hozzáférhető maradjon

- b. ne legyen fizikailag kapcsolatban a vizsgált személyel
- c. ha szükséges, képes legyen stabilizálni a kapott eredményeket
- d. a rendszer *pontossága* néhány százalékos (1–2 szögperces) eltérést engedjen meg
- e. támogasson legalább egy szögperces *felbontást* másodpercenként, hogy a szem-pozíció legkisebb változása is követhető legyen; a felbontásnak csak az érzékelő eszköz zaja szabjon határt
- f. támogasson kellően széles *dinamika-tartományt* a szem mozogásainak leképezé-séhez
- g. a rendszer időbeli dinamikája legyen megfelelő (jó erősítés, kis fázistolás)
- h. nyújtson *valósidejű* válaszidőt
- i. legyen *invariáns* minden forgási és eltolási szabadságfokra
- j. egyszerűen kiterjeszthető legyen minden két szem feldolgozására (*binokuláris* vizs-gálat)
- k. *kompatibilis* meglévő legyen fej- és testfelvételek használatával
- l. tesztalanyok széles skáláján (pl. nem, kor, rassz szerint, vagy szemüvegesek és szemüveg nélküliek körében) használható legyen

A fent felsorolt követelmények valóban az ideális esetet testesítik meg. Sokszor egy követelmény enyhítésével, vagy figyelmen kívül hagyásával más követelmények kielégítése jelentősen egyszerűsödik. Ha például a b. pont szerinti fizikai kontaktust még megengedjük, rögzíthetjük a követésre használt kamerát a vizsgálni kívánt alany fejéhez (természetesen kellően diszkrét és kényelmes módon). Ebben az esetben a i. pont szerinti invariancia biztosítása márás egyszerűbb feladat, mint különböző nézőpontból geometriai transzformációk segítségével végezni ugyanezt.

Több más, látszólag egymásnak ellentmondó követelményt is észrevehetünk az ideális tekintetkövető eszköz 12 pontja között. Komoly megoldandó mérnöki fel-adatot jelent az ütközések feloldásával az ideális eszközök különböző, valós életben használható megoldásokká alakítani.

A gyakorlatban használható tekintetkövetési megoldások egy lehetséges csoporto-sítása az alábbi elveken működő iránymeghatározásokat tartalmazza:

1. a szem felületének (vagy a felület speciális megvilágításának) alapján, optikai elven
2. a szem körüli bőrfelület elektromos potenciáljának mérésével
3. speciális kontaktlencse használatával

Már csekély megfontolással látszik, hogy minden csoportnak vannak előnyei és hátrányai. Például az 1. csoportba tartozó megoldások igénylik a legkevésbé – többnyire egyáltalán nem – a fizikai kontaktust a vizsgált személyvel. Azonban elköpzelhető, hogy ennek az az ára, hogy az ebbe a csoportba tartozó megoldások nem veszik fel a versenyt a másik két alapelv szerint fejlesztett rendszerekkel pl. a pontosság, vagy valamely más kritérium tekintetében.

Ennek megfelelően szükség van a lehetőségek számba vételére, értékelésére, majd összehasonlítására, hogy a legmegfelelőbb technikát tudjuk kiválasztani, ha tekintetkövető eszköz (alkalmazás) fejlesztésébe fogunk. A következő szakaszokban ezért röviden ismertetem a fenti kategóriákba eső megoldások alapjait, majd összehasonlítom jellemző tulajdonságaikat, valamint a használatukkal elérhető fontos pontossági- és sebességértékeket.

2.1.2. Optikai elvű követés

Az optikai elvű követés során – a nevéből adódóan – optikai úton próbáljuk meg- határozni a tekintet irányát. Ez történhet speciális megvilágítás nélkül, pl. az írisz (Pontosabban az írisz és az ínhártya közti határvonal, a limbus), vagy a pupilla követésével.

A másik lehetséges megoldásra a szem speciális, többnyire infravörös fénnnyel történő megvilágítása, majd a szemgolyó felületén megjelenő tükröződések, visszaverődések vizsgálata kínálkozik. Az infravörös megvilágítás előnye a látható fénnnyel szemben egyszerű az, hogy nem zavarja a vizsgált személyt, nem vonja el a figyelmét, másrészről pedig infraszűrők használatával a látható fény tartományába eső változásokkal a megfelelő körülmények között (lehetőleg kevés napfény a magas infratartalma miatt) invariánssá tehető.

Limbuskövetés

Az írisz és az ínhártya közötti határvonal a többnyire nagy intenzitásváltozás miatt könnyen detektálható lehet. Ugyanakkor meg kell jegyeznünk, hogy az esetek jelentős részében a limbus számottevő része lehet a szemhéjak takarásában. Ennek megfelelően a technika csak vízszintes helyzet és mozgás követésére alkalmas kielégítő pontossággal [4].

Klasszikus esetben ez a követési technika a limbus *relatív* fejhez képest helyzetén alapul, ezért a vizsgálat közben a fejmozgások teljes hanyagolását, esetleg a tekintetkövető eszköz fejhez rögzítettségét igényli.

Pupillakövetés

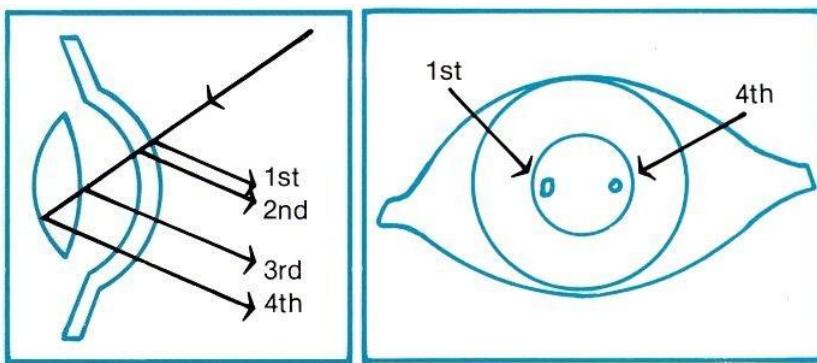
A pupillakövetési technika hasonló az előbb említett limbuskövetéshez, de némi többlet előnyt is magában hordoz. Az egyik ilyen előny, hogy a pupilla közel sincs olyan nagy részben a szemhéjak takarásában, mint a limbus, ennek következtében függőleges irányú követés is megvalósítható lehet. A másik előny, hogy az írisz és a pupilla közti határvonal jóval élesebb, mint az írisz-ínhártya határa, ezért jobb felbontással, pontosabban tudjuk meghatározni a nézeti irányt.

Az előző technikához képest azonban meg kell említeni a felmerülő nehézségeket is. A kontraszt ugyan lehet, hogy nagyobb az írisz-pupilla határon, azonban

az intenzitáskülönbség nem olyan jelentős, mint a limbus környezetében. Az sem elhanyagolható szempont, hogy a pupilla átmérője is szükségszerűen kisebb, mint az íriszé, vagyis a forrásnak relatívan nagyobb felbontásúnak kell lennie, hogy azonos pixelnyi méretű pupillát és íriszt detektálhassunk; ellenkező esetben a kisebb abszolút méret a pontosság rovására mehet.

Visszaverődés-alapú követés

A szemet (infravörös) fénnel megvilágítva több tükröződés is megfigyelhető lesz a szemlencse és a szaruhártya határán: ezek az úgynevezett *Purkinje-képek* (lásd 2.1. ábra).



2.1. ábra. A Purkinje-képek elhelyezkedése. Forrás: <http://bit.ly/YnAowY>

Ezen visszavert képek intenzitása sorrendben egyre csökken, az első azonban (közkeletű nevén az úgynevezett „csillanás”, angolul *glint*) még viszonylag egyszerűen detektálható. Infravörös megvilágításban ugyancsak egyszerű a megfelelő kamerával a pupilláról visszavert fény detektálása – a pupilla a környezeténél jóval nagyobb mértékben veri vissza az infravörös fényt, az infraképen egy „fényes”, kontrasztos objektumot alkotva.

A fenti két objektum egymáshoz viszonyított *relatív* helyzetéből következtethetünk a tekintet irányára, ugyanis az első Purkinje-kép világos pontja, illetve a pupilla kontrasztos ellipszise egymással összefüggésben mozdulnak el a fej vagy a szem mozgatásának következtében.

A előző bekezdésben foglaltakból látszik, hogy a technika nem igényeli a fej modulatlanságát, vagy a képfelvező eszköz fejhez rögzítését. Ezen előnye azonban egy megkötést is magával hordoz: egyszerű algoritmusok segítségével kb. $\pm 12\text{--}15$ foknyi szabadsága van a felhasználónak a fejmozgásokra [4], nagyobb mértékű mozgások esetén ugyanis komplexebb matematikai számítások szükségesek a követett objektumok mozgásának modellezéséhez.

A visszaverődés-alapú megoldásokkal rokonítható még az a módszer, amikor szintén az első Purkinje-kép erős visszaverődését detektálva a képen, kivágunk egy viszonylag kicsi (párszor tíz pixel nagyságrendű) részt, a csillanással a középpontban. Az így kapott képről egy neurális hálózat dönti el, hogy milyen nézeti irányhoz tartozik [6].

A neurális hálózatot természetesen be kell tanítani a használhatóság érdekében. A betanítási procedúra első lépéseként tanítóképeket kell generálni, általános esetben

pár percet vesz igénybe, ami alatt a követnie kell egy, a képernyőn megjelenő jelzést. A tanítóképek birtokában ezután a hálózat betanítható, ez a jelenlegi technikai szint mellett kb. tíz perces nagyságrendű időt vesz igénybe. Azonban azonos körülmények és tesztszemély esetén a tanítást nem kell máskor újra elvégezni.

A neurális hálózat előnye a betanítás után, használat közben mutatkozik meg leginkább: felépítéséből adódóan a háló nagyon rövid idő alatt „döntést tud hozni”, így a valósidejű feldolgozási sebesség kritériuma mindenkorban kielégített lesz. A döntés eredménye ráadásul akár közvetlenül felhasználható: mindenkorban úgy kell megterveznünk a rendszert, hogy a neurális háló kimenet közvetlenül egy kétdimenziós koordinátát szolgáltasson a felhasznált képernyő koordináta-rendszerében.

A módszer egy másik előnye, hogy nem igényel közeli, nagy felbontású képet a szemrégióról, egy átlagos felbontású kamerával, pl. kartávolságból is elegendő nagyságú lesz a szemrégió. Ennek egyik folyományaként – hogy nagyobb látószögű képek használhatók – adódik, hogy viszonylag nagy mozgási szabadsága lehetséges a vizsgált személy fejének tekintetében, anélkül, hogy a kamerát újra kéne pozicionálnunk.

Ennek a szabadságnak azonban ára van: ha a kalibrálási fázis során több fejpozícióból is rögzítettünk tanító képeket, akkor a betanítás után a neurális hálózat jó esélyel fogja felismerni különböző fejpozíciókban is a tekintet irányát; a mozgási szabadság azonban a pontosság csökkenésével jár. A pontosság egyébként is érzékeny pontja az eljárásnak, ezt pedig éppen úgy növelhetjük, ha tanítás és előhívás közben *nem* engedjük meg, hogy a fejpozíció változzon.

Purkinje-képek követése

Egy további lehetséges optikai elven működő tekintetkövetési technikát mutatott be Müller *et al* 1993-ban [7], „*Kettős Purkinje-kép*” (Dual-Purkinje Image) módszer néven. Az eljárás lényege, hogy a már említett első és negyedik Purkinje-kép egymáshoz viszonyított helyzetéből számítja a tekintet irányát. Megfelelő matematikai modell esetén a módszer rendkívül pontos, azonban a negyedik Purkinje-kép alacsony intenzitása miatt hatványozottan érzékeny a megvilágítási problémára.

2.1.3. Elektromos potenciál-alapú követés

Az eddigiek től egy merőben eltérő megközelítése a problémának az *elektro-okulográfia* (EOG). Az eljárásból nyerhető elektro-okulogram rögzítése pl. megismerési és kognitív folyamatok, a vizuális információfeldolgozás, vagy az alvásvizsgálat terén szokásos.

A módszer a szemgolyó elülső és hátulsó pólusa közötti potenciálkülönbség mérésén alapul, amellyel mind függőleges, mind vízszintes irányban követhető a szem mozgása, de csak körülbelül 1–2 fok pontossággal. A használata azonban korántsem mondható egyszerűnek: az potenciálváltozást érzékelő elektródák (lásd 2.2.) miatt szükséges fizikai kontaktuson kívül a rendszer kalibrációja rendkívül hosszadalmas, és hozzáértést igénylő feladat.

2.1.4. Követés speciális kontaktlencse használatával

A szem helyzetének, ebből közvetve a tekintet irányának számításához speciális kontaktlencséket is használhatunk. Az egyik lehetséges megoldás, hogy a lencse anyagá-



2.2. ábra. Az EOG eljárás elektródái. Forrás: <http://bit.ly/13a7Icl>

ban olyan véseteket alakítanak ki (tipikusan valamilyen könnyen felismerhető mintázatot), amelyek a fénytörés felhasználásával megkönnyítik a szem helyzetének meghatározását.

Ha azonban egy megfelelően kis méretű indukciós tekercset is sikerült a kontaktlencse anyagába ágyazni, akkor a fej körül generált nagyfrekvenciás elektromágneses mezőkkel az tekercs helyzete közvetlenül is könnyen meghatározható. Az eljárás körülmenyessége azonban kétségesen teszi a technika laboratóriumokon kívüli felhasználását.

2.1.5. A tekintetkövetési módszerek összehasonlítása

A 2.1. táblázat tartalmazza az ebben a szakaszban felsorolt tekintetkövetési módszerek összehasonlítását. Az összehasonlítás szempontjai a módszer által igényelt kontaktust, az általa nyújtott pontosságot, illetve felbontást (hogy a bemeneti képen mekkora minimális elmozdulás jelent változást a kimeneti pozícióban) jelentik.

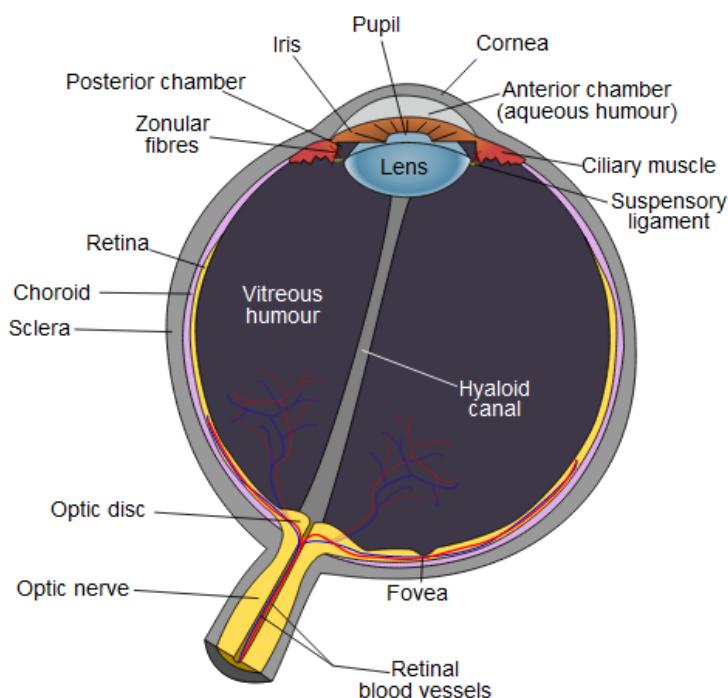
2.1. táblázat. A felsorolt tekintetkövetési módszerek összehasonlítása.

	kontaktus	pontosság	felbontás
limbuskövetés	pl. áll-tartó	1–7°	0,1°
pupillakövetés	nincs	0,003°	0,005°
visszaverődés alapú	nincs	0,5–2°	jó
neurális hálózat	nincs	1,5°	–
kettős Purkinje-képek	nincs	0,017°	0,25°
elektro-okulográfia	elektródák	±1,5–2°	jó
kontaktlencse	kontaktlencse	0,08°	0,017°

2.2. Szemmozgások

A szemmozgások többsége – így a későbbi vizsgálatok szempontjából fontosak is – a retinán elhelyezkedő sárgafolt (*fovea centralis*, lásd 2.3. ábra) helyzetének megváltoztatására szolgál. A látóideg kivezetése mellett elhelyezkedő sárgafolton csak tömörtől egymás mellé rendeződött csapok találhatók. A csapok jó fényviszonyok

mellett nagyon magas felbontásban képesek színek gazdag skáláját feldolgozni, ezért a legélesebb látás a sárgafoltra vetített kép esetén lehetséges. Érthető tehát, hogy a sárgafoltot olyan pozícióba célszerű mozgatni, hogy a figyelem tárgyának képe ide vetüljön. Az ehhez szükséges pozicionáló típusú szemmozgások közé tartoznak a *szakkádok*, a *lassú követések*, és – bár meglepőnek tűnik – a *fixációk* is, ezekkel a fejezet további szakaszaiban részletesebben foglalkozok.



2.3. ábra. Az emberi szem felépítése. Forrás: <http://en.wikipedia.org/wiki/Eye>

A *fovea* pozicionálását elősegítő mozgások mellett természetesen más is szerepet kap a kívánt kép előállításában. A teljesség igénye nélkül, ilyenek például a szem divergenciáját illetve konvergenciáját beállító mozgások (mélységerzékelés), valamint azok a reflexszerű mozgások, amelyek az egyensúlyszervvel összhangban beállítják a szemeket a fej térbeli orientációjának megfelelően.

A szakasz első részében sorra vessem, és bemutatom a pozicionáló típusú szemmozgások alapjait, a mérnöki megközelítésből jelentéktelen részleteket mellőzve. Végül a 2.2.5. szakaszban összefoglalom a megszerzett ismereteket, valamint hogy a megismert mozgások milyen követelményeket, illetve korlátozásokat támásztanak a realizálandó rendszer tervezése során.

2.2.1. Szakkádok

A szakkád minden két szem gyors, egyidejű, azonos irányú mozgását jelenti. Célja a fixáció áthelyezése az egyik tárgyról a másikra. A mozgás során észlelt jellegzetes „ugráló” mintáról kapta a nevét: a francia *saccader* szó jelentése „rángatás”, „ugrás”.

A szakkádok lehetnek akaratlagosak és reflexszerűek is. Az egyensúlyszervből érkező jelre például reflexszerűen aktiválódhatnak, míg a tekintetünk, figyelmünk átheleyzése nyilvánvalóan akaratlagos cselekedet. Időtartamban a szakkádok körülbelül 10 és 100 ms közé lehetők. Ez kellően rövid ahhoz, hogy az agy a gyakorlatban ne észlelje, hogy a mozgás alatt nem történik információfelvétel – vagyis a szakkádikus mozgás közben pár pillanatra effektíve vakk vagyunk. [8]

A szakkádok végrehajtásáról megoszlanak a vélemények. Korábban a szakkádokat ballisztikusnak tartották, vagyis amint a következő fixációs pont helye kiszámításra kerül (nagyjából 200 ms idő alatt), a mozgás már nem megszakítható vagy megváltoztatható. [9] Ezt a feltevést támasztotta alá a tény, hogy a végrehajtás 10-100 ms-os időtartama alatt vizuális visszacsatolásra nincs elegendő idő. Léteznek feltevések azonban, amelyek szerint nincs szükség vizuális visszacsatolásra a végrehajtás közbeni megváltoztatáshoz, így a mozgás ballisztikussága (a nagy sebességek miatt) csak látszólagos. [10]

2.2.2. Lassú követések

A lassú követés (*smooth pursuit*) mozgó tárgyak vizuális követésére szolgál. Az ilyen típusú mozgás könnyen modellezhető egy negatív visszacsatolású szabályozóval. [9]

Egy bizonyos sebességgel a szem képes tisztán lassú követést használni a fixáció tárgyon tartására, azonban a $30^{\circ}/s$ sebességnél gyorsabban mozgó tárgyak esetén a megfelelő követéshez általában szakkádok beiktatása szükséges. Itt jegyzendő meg, hogy a lassú követés vízszintes és függőleges irányban nem szimmetrikus: a legtöbb ember a vízszintes mozgásokat jobban, míg a függőleges mozgásokat kevésbé tudja lekövetni (ahol „jó” követésen azt értjük, hogy nem szükséges szakkádok beiktatása). A szakkádokkal ellentétben a lassú követést egyértelműen megváltoztathatja az érzékeltek vizuális visszacsatolás, a mozgás nem ballisztikus.

Érdekesség, hogy a legtöbb vizuális stimuláció (tényleges mozgó tárgy) nélkül nem tudnak lassú követéses szemmozgást előidézni, csak rövid szakkádok gyors egymásutánját. Szintén megemlítendő, hogy a lassú követés bár hasonlónak tűnik ahhoz, amikor a fej mozgását „kompenzálva” egy álló tárgy képét fixáljuk a látómezőn, a két mozgás alapvetően különbözik: már abban is, hogy míg az egyik akaratlagos, a másik reflexszerűen hajtódik végre.

2.2.3. Fixációk

A fixációs mozgások a retina stabilizálására szolgálnak, aminek köszönhetően az álló objektumokat tudjuk figyelmünk középpontjában tartani. Az előző szakasz alapján azt gondolhatnánk, hogy a fixációt ugyanazok az idegi pályák aktiválhatják, mint amelyek a lassú követésért felelősek, minden össze a „mozgás” sebessége zérus.

A fixáció azonban több, mint nulla sebességű mozgás: a fixációk közben *tremor*, *drift* és *mikroszakkád* jellegű mozgások váltják folyamatosan egymást. Az állandó mozgást a fényérzékelő sejtek felépítése indokolja. Ha a kép pár másodpercnél tovább marad teljesen változatlanul a retinán, a sejtek telítésbe kerülnek, és a tekintet elhomályosul.

2.2.4. Nystagmus

A nystagmus szakkádok és lassú követések egymásutánja, nem akaratlagos szemmozgás. Előidéződhet optokinetikus úton, illetve patológiásan is (pl. kábítószer-használat hatására). Patológiás nystagmus jelenléte orvosi szempontból lehet jóindulatú, de akár mélyebb neurológiai problémákra is utalhat.

2.2.5. Összegzés

A fejezet első szakaszában röviden bemutattam a *fovea* pozicionálására szolgáló szemmozgásokat, amelyek alapszintű megismerése elengedhetetlen a tekintetkövető rendszer fejlesztése során. A rendszernek – ahogy ez a mozgások tulajdonságaiból kitűnik – mind a gyorsaság, mind a pontosság tekintetében komoly követelményeket kell teljesítenie.

Az elérődő *gyorsasághoz* a szakkádok, mint a leggyorsabb sebességű mozgások időtartama (10-100 ms) adhat támpontot. Egy átlagos kamerakép 60 Hz-es frissítése legjobb esetben 16 ms időközönkénti vizsgálatot tesz lehetővé. Ez az eredmény egy tipikus drágább, digitális webkamera 30 képkocka/másodperces képfrissítésével már 33 ms-ra csökken, nem is beszélve a 30 FPS-nél gyengébb teljesítményű kamerákról. Tisztában kell lennünk tehát azzal, hogy átlagos képrögzítő hardver használatával előfordulhat olyan szituáció, hogy fizikailag képtelenek vagyunk a nagyon gyors szakkádok pontos követésére.

A *pontosság* tekintetében azt kell figyelembe vennünk, hogy (pl. olvasásnál) a két egymást követő fixációs pont közti eltérés akár szögperces nagyságrendű is lehet. Ezek korrekt elkülönítéséhez nyilvánvalóan minél nagyobb felbontás szükséges. Minél kisebb felbontásúak a felvételek (azaz a szem, illetve a pupilla megjelenítésére relatíve kevesebb képpont kerül), annál nagyobb elmozdulás jut egyetlen képontra, ami a feldolgozás során a legkisebb elkülöníthető egység.

2.3. Optikai megfontolások

Az optikai megfontolások közül az első a tekintetkövetés során felhasznált fénytartomány, ami lehet a látható fény tartománya, valamint az infratartomány. A második fontos szempont pedig a kamera látószöge, ami alapjaiban határozza meg a felhasználótól megkívánt beavatkozás mértékét, valamint a szem felbontását (ezzel közvetve az elérhető maximális pontosságot).

A **látható fényben** történő követés egyértelmű előnye, hogy nem igényel speciális hardvert, a legtöbb, a piacon kapható analóg vagy digitális (web)kamera ebben a tartományban „lát”. Sőt, a digitális eszközökben a CMOS/CCD érzékelő elé szinte minden esetben ún. infratükröt (felülvágó szűrőt, amely kirekeszti a látható fény feletti spektrumot) helyeznek, ezeket az eszközöket tehát sikkerrel csak látható fényben használhatjuk. A látható fény használatakor azonban nem feledkezhetünk meg annak hátrányairól sem: a követéshez analizálandó kép meglehetősen érzékeny lesz a megfelelő megvilágításra. A fényviszonyok változásának kiküszöbölése komolyabb előfeldolgozást kíván, és extrém esetekben nem is minden teljesíthető.

Az **infratartománynak** a látható fénnyel szemben vannak előnyei, és hátrányai is. Az előnyök közé tartozik, hogy a pupilla képe a infra megvilágításban nagyon



2.4. ábra. Az emberi szem képe infravörös fényben. Forrás: <http://bit.ly/aKwzsZ>

kontrasztos (lásd 2.4. ábra), jóval könnyebben szegmentálható az írisztől (különösen sötétebb szemű alany esetén), mint látható fényben. Az infrás megvalósítás hátránya azonban, hogy a megfelelő működéshez sötétet igényel (igaz, ezzel összhangban a látható megvilágítási változásokra invariáns), de sötétben, a tisztán infra megvilágítás megvalósítása nehéz feladat, különösen a piacon kapható egyszerűbb infra LED-ekkel, vagy LED-es reflektorokkal.

A követéshez használt kamera optikája lehet egyrészt **nagylátószögű**. Ez azzal az előnyivel jár, hogy a vizsgálat alatt álló személy fejmozgása szabadabb lehet, nincs szükség a fejpozíció fixálására (pl. álltámasszal). A szemrégió külön szegmentálható, majd ezen régió belül a pupillát követve valósulhat meg a tekintetkövetés. A módszer hátránya, hogy a szemrégió nem tölti be az egész képet, vagyis nem használja ki maximálisan a rendelkezésre álló felbontást. Ennek következtében a tekintetkövetés pontossága jelentős mértékben romolhat, esetleg lehetetlenné is válhat.

További lehetőség a **teleobjektívek**, vagyis zoomoptikák használata. Teleobjektívvel a szemrégió „közel hozható” még nagy távolságról is, hogy teljesen kitöltsse a feldolgozandó képet, kihasználva annak teljes felbontását. Ez azonban azzal a hátránnal jár, hogy a fejet fix pozícióba kell kényszeríteni (pl. egy álltámasz segítségével), ugyanis a fej mozgásával a pupillarégió kikerülhet a kamera látószögéből.

Végül lehetőség nyílik egyfajta „hibrid” megoldás használatára is, amelynél a két megoldás előnyeit ötvözhetjük.

3. fejezet

Elméleti alapok

+++ bevezeto a fejezethez +++

+++ Hough-t megvagni? +++

+++ melyik szakaszban mi van +++

3.1. Hough-transzformáció

Képfeldolgozási szűrők, függvények segítségével viszonylag könnyen előállíthatjuk a képtérben számunkra érdekes pontok halmazát. Azokat a pontokat, amelyek valamilyen magasabb absztraktós szintű képjellemzőhöz kapcsolódnak: például a tárgyak, alakzatok formáját megadó kontúrok pontjait. Ha viszont szeretnénk „megérteni” is a képet, az ilyen formák automatikus és robosztus felismerése szinte elengedhetetlen.

A valóságban a kontúrok pontjai azonban csak többé-kevésbé illeszkednek ideális formákra (egyenesekre, körökre, vagy egyéb görbékre): az éleket torzíthatja zaj, egyes él pontok hiányozhatnak, vagy a felismerni kívánt formák kismértékben el is térhetnek az ideálistól. A kép analízise szempontjából azonban ezzel együtt is nagyon értékes információt rejthetnek magukban, ezt az információt pedig hasznos lenne kinyerni. Viszont egyáltalán nem triviális probléma a valamelyen szempontból összetartozó (például egy egyenesre, vagy egy kör vonalra eső) pontok csoportosítása.



3.1. ábra. Egyenesek keresése Hough-transzformáció használatával.
Forrás: <http://href.hu/x/c91h>

A Hough-transzformáció erre a problémára kínál megoldást. Feladata egyszerű formák, úgymint egyenesek, körök, ellipszisek keresése képeken. Az alakzatok keresését a transzformáció egy ún. paramétertérben végzi egy szavazási mechanizmus

segítségével. A felismert potenciális objektumok az akkumulátortér – a paramétertér egyfajta futás közbeni leképezése – lokális maximumai alapján adódnak.

Történelmi áttekintésként megjegyezhetjük, hogy a Hough-transzformációt Paul Hough alkotta meg 1959-ben buborékkamra-fényképek gépi analíziséhez [11]. Ebben a cikkben Hough még csak egyenesek felismeréséről beszél. A manapság használt transzformációt Richard Duda és Peter Hart fejlesztette ki 1972-ben „általánosított Hough-transzformáció” néven [12], tíz évvel azután, hogy Paul Hough szabadalmaztatta módszerét. Az ő kiegészítésük már lehetővé tette, hogy a transzformáció nemcsak egyenesek, hanem körök és más analitikusan leírható görbék keresésére is felhasználható legyen.

A gépi látás felhasználói körében azonban igazán csak Dana H. Ballard 1981-es cikke [13] nyomán lett népszerű, aki a transzformáció még további felhasználási lehetőségeit vetette fel. Eredményeinek köszönhetően a módszer analitikusan nem (vagy csak nehezen) leírható formák keresésére is alkalmazhatóvá vált. Félreértesekre adhat okot, hogy mind Duda és Hart, mind Ballard az „általánosított” megnevezést használja a módszer általuk kitalált kiegészítéseinek. A továbbiakban az „általános” jelzőt a Duda–Hart-féle kiegészítés megnevezésére használom, ahol Ballard módszerről esik szó, azt külön jelzem.

A transzformáció általános formájában tehát analitikusan leírható formák keresésére használható. A legegyszerűbb ilyen forma az egyenes, ennek segítségével érthető meg legkönnyebben az algoritmus működési elve. A 3.1.1. szakaszban ezért az egyenesek keresésének elméletét foglalom össze. Ezen elv később már könnyen kiterjeszthető tetszőleges formák keresésére, különös tekintettel a pupilla-keresés szempontjából fontos körkeresési problémára, amelyre a 3.1.2. szakaszban térek ki. A 3.1.3. szakaszban szót ejtek még a módszer további kiegészítési lehetőségeiről, majd a 3.1.4. szakaszban összefoglalom a Hough-transzformáció használatának korlátait, előnyeit és hátrányait.

3.1.1. Egyenesek keresése

Egyenes-reprezentációk

Egyenesek leírására többféle modell használható. Az egyenes „klasszikus” modellje Descartes-koordinátarendszerben az

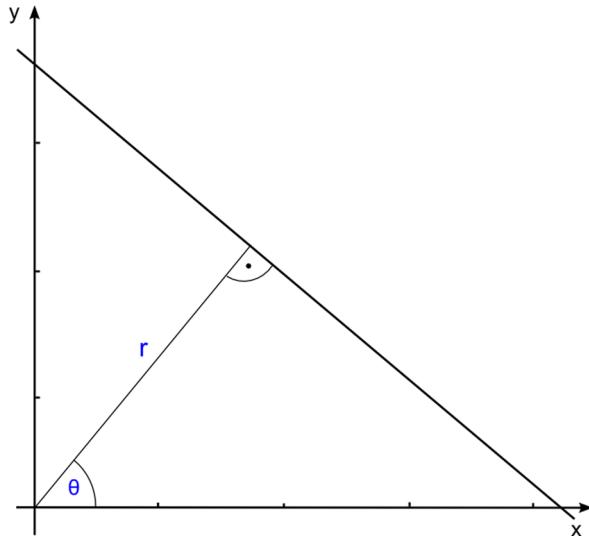
$$y = m \cdot x + b \quad (3.1)$$

reprezentáció, ahol m az egyenes meredeksége (iránytangense), a b konstans az ordinátatengely-metszet, vagyis az egyenes és az y tengely metszéspontja.

A (3.1) egyenlettel megadott modellel az a probléma, hogy a koordinátarendszer y tengelyével párhuzamos, vagy ahoz közelítő egyenesek leírására nem használható m végtelen nagy értéke miatt. Nem szerencsés azonban az ilyen „függőleges” egyenesek kizárása a számításból. Ennek kiküszöbölésére – jelen esetben – jobb modellként segítségül hívhatjuk a **Hesse-féle normálalakos** reprezentációt. Ez az

$$r = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (3.2)$$

egyenlettel adja meg a kívánt egyenest, ahol r az origótól mért távolságot, θ pedig az egyenes pozitív valós féltengellyel bezárt szögét jelenti (lásd 3.2. ábra). Ezzel a megvalósítással már nem ütközik akadályba az y tengelyhez közelítő egyenesek modellezése.



3.2. ábra. Egyenes jellemzése r és θ paraméterekkel.

Érdekességeként megemlíthető, hogy bár nyilvánvalónak látszik a Hesse-féle normálalak előnyösebb volta, Paul Hough eredeti szabadalmában¹ mégis az $y = m \cdot x + b$ formát használta az egyenesek jellemzésére. Az (r, θ) paraméterezés Duda és Hart már hivatkozott cikke nyomán vált általánosan használttá. [12]

A paramétertér és az akkumulátor

Minden képtérbeli egyenes tehát (3.2) felhasználásával megfeleltethető a paramétertérben egy (r, θ) párral jellemzett pontnak. Az egyértelmű megfeleltetés végett két lehetőségünk is adódik a paraméterek korlátainak megválasztására. Ezek formálisan

$$\theta \in [0, 180^\circ) \quad \wedge \quad r \in \mathbf{R} \quad (3.3)$$

vagy

$$\theta \in [0, 360^\circ) \quad \wedge \quad r \geq 0 \quad (3.4)$$

Az (r, θ) párok terét **paramétertérnek**, vagy **Hough-térnek** hívjuk. A paramétertér dimenzióját az ismeretlen paraméterek száma adja, egyenesek esetében ez

¹U.S. Patent 3,069,654 – <http://www.google.com/patents?q=3069654>

tehát kettő.

Egy (x, y) ponton keresztül végtelen sok egyenes húzható, és minden egyenes kielégíti a (3.2) összefüggést. Ezek az egyenesek a paramétertérben ábrázolva egy szinusz-jellegű görbét alkotnak. Természetesen nem határozhatunk meg tetszőleges pontossággal egy pontot, és nem is vehetünk számításba minden (végtelen számú) olyan egyenest, ami az adott ponton átmegy. Szükség van ezért a paramétertér diszkrétizálására.

A paramétertér gyakorlati (kvantált) reprezentációja az **akkumulátor**. Az akkumulátor egy tömb, dimenziószáma megegyezik a paramétertér dimenziószámával.

A tömbök indexelése egész számokkal történik ezért az r paramétert egész számokra célszerű kvantálnunk. A θ paraméter kvantálásához pedig a végtelen sok egyenes figyelembe vétele helyett az (x, y) koordinátán keresztül húzhatunk egyeneseket $\Delta\theta$ fokonként. Ebből következően a (3.3) vagy (3.4) összefüggések alapján az akkumulátor ezen dimenzióját $180^\circ/\Delta\theta$, illetve $360^\circ/\Delta\theta$ darab diszkrét részre osztja. A $\Delta\theta$ paraméter megválasztásával, a módszer „finomságát” növelhetjük. Például $\Delta\theta = 5^\circ$ választás esetén a transzformáció csak a pozitív valós félengellyel 0, 5, 10, ... fokot bezáró egyenesek felismerésére képes. Túl kis érték választása esetén viszont az eljárás memória- és időigénye fog az egekbe szökni. A $\Delta\theta$ érték gondos megválasztásával tehát a pontosság és gyorsaság egy lehetőleg optimális értékét kell meghatároznunk.

Gyakorlati szabályként elmondható, hogy 1 fok pontosságnál többre ritkán van szükség. Túl vastag vonalak (amik pedig logikailag összefüggő egyenesek), zajos kép, vagy túl rövid vonalszakaszok esetén így is romlik a felismerés esélye. Hogy miért, arra a következő szakasz – a szavazási mechanizmus ismertetése – ad választ.

A keresés folyamata

A továbbiakban tételezzük fel, hogy a kép bináris, és megfelelően előfeldolgozott (pl. élkeresés, küszöbözés), azon már csak a felismerni kívánt egyenesek pontjai találhatóak. A háttér képpontjait jelölje a 0 érték, az érdekes pontokat tartalmazó előtér képpontjai legyenek 1 értékük.

A keresés folyamán bejárjuk a képteret pixelről pixelre. A 0 értékű képpontok biztosan nem részei egy képen található egyenesnek sem, ezért ezekkel nem kell foglalkozunk. Ha 1 értékű pixelt találunk az (x, y) helyen, az potenciálisan része lehet egy, a képen található egyenesnek. Az akkumulátor minden θ értékhez (pl. fokonként) meghatározzuk az (x, y) ponton átmenő, θ irányú egyenes origótól vett r távolságát a (3.2) összefüggés alapján. Az akkumulátortömb értékét minden így kiszámolt (r, θ) indexekkel jelölt helyen megnöveljük (r meghatározásánál természetesen a tömb kvantáltságát figyelembe véve). Ezt a folyamatot úgy is mondhatjuk, hogy az (x, y) pont a kiszámított (r, θ) pontok halmazára, vagyis ezen paraméterek által a képterben képviselt egyenesekre „**szavaz**”.

Az algoritmus első fázisának lefutása után az akkumulátortömböt kell vizsgálnunk. Optimális esetben a képen egy egyenesre eső pixelek mindegyike (a többi más szavazatuk mellett) szavazott a „valódi” egyenest jelentő (r, θ) párra. Az akkumulátortömb maximális értékű (r, θ) elemei adják meg tehát a képen található egyeneseket. A zaj, az esetleg több pixel széles vonalak, és a kvantálási pontatlanság miatt azonban célravezetőbb **lokális maximumokat** (lásd 3.3. ábra) keresni az akkumulátortömbben így meghatározva a **legvalószínűbb** egyenesek r és θ paramétereit.



3.3. ábra. A képtér (balra) és az ebből származó paramétertér (jobbra) egyenesek keresése során.

Forrás: <http://href.hu/x/c91i>

Az előző szakasz végén felvetett problémát most már megválaszolhatjuk. A túl nagy zaj miatt megnő azon képpontok száma, amik nem részei egy egyenesnek sem. Azonban szavazni ezek a képpontok is szavaznak, ezzel mintegy „háttérzajt” adva az akkumulártömbnek. Túl vastag vonalak esetén pedig több, látszólag helyes paraméterezésű egyenes adódna ugyanarra a vonalra (pl. egymással a vonalon belül párhuzamos egyenesek, de kellően vastag vonal esetén akár „átlós” egyenesek is). Az első esetben az akkumulártömb elemeinek átlagos értéke nő meg, a második esetben pedig a sok egymáshoz közeli szavazat miatt lokális maximumok értékei kerülnek közelebb az átlagos tömbértékekhez. Mindkét esetben nehezebbé válik a lokális maximumok pontos meghatározása, ez pedig drasztikusan csökkentheti a keresés pontosságát.

3.1.2. Körkeresés

Körök reprezentációja

A körökhöz megfelelő reprezentáció megtalálásához még annyit sem kell törnünk a fejünket, mint az egyeneseknél tettük. Descartes-koordinátarendszerben az (x_0, y_0) középpontú r sugarú körvonai pontjait az

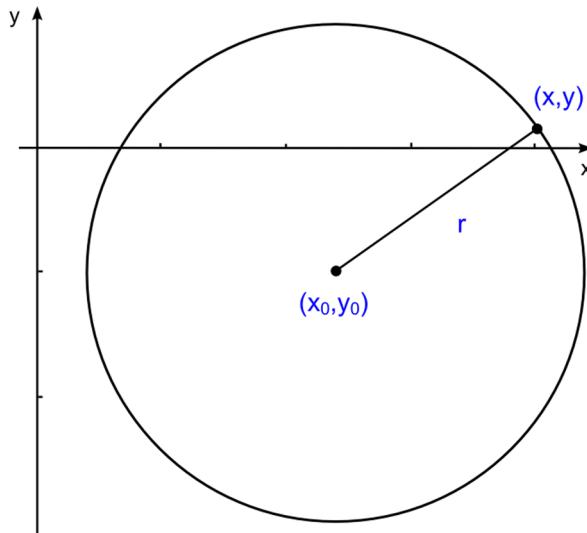
$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (3.5)$$

egyenlet adja meg (3.4. ábra). Szögfüggvények használatával az (3.5) egyenletet átalakíthatjuk

$$\begin{aligned} x &= x_0 + r \cdot \cos \theta \\ y &= y_0 + r \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (3.6)$$

formára, ahol (x_0, y_0) szintén a kör középpontjának koordinátái, r a sugár, θ pedig

a körvonal egy pontját a kör középpontjával összekötő szakasz pozitív valós félten-gellyel bezárt szögét jelenti.



3.4. ábra. Körök reprezentációja.

A paramétertér körök esetében

Látható, hogy körök esetében már csak akkor elegendő két paraméter – az (x_0, y_0) középpont-koordináták – a forma leírásához, ha előre adott sugarú köröket keresünk, vagyis r konstans. Ez azonban csak bizonyos esetekben használható, általános esetben túl nagy megkötést jelent. Tehát a paramétertér dimenziószámát növelnünk kell: az r sugárparaméter dimenziójával együtt az már **három dimenziós** lesz.

A paraméterteret az akkumulátor tömb mivoltából adódóan itt is egész számokra kell kvantálnunk. Körkeresés esetén az akkumulátor tehát egy három dimenziós tömb, amely a középpont két koordinátájának és a sugárnak egész értékeivel inde-xelhető. Már a pontos algoritmus ismerete nélkül is látszik, hogy a potenciális körök keresése jóval komplexebb művelet az ismeretlen paraméterek magasabb száma miatt.

A körkeresés folyamata

Az alaphelyzet legyen az egyenesek keresésekor felállított: a felismerni kívánt körvonalak képpontjai legyenek 1, a háttér felismerés szempontjából érdektelen képpontjai pedig legyenek 0 értékűek.

A bejárás során 1 értékű pixelt találva jóval több számítani valónk van, mint egyenesek esetében. Az akkumulátor **összes lehetséges r sugárparaméterére** meg kell határoznunk a potenciális körök középpontjait. Ehhez felhasználjuk az (3.6) összefüggéseket r és θ ismeretében (θ lehetséges értékeinek megválasztása – tipikusan például fokonként – azonos elven történhet a 3.1.1. szakaszban olvashatóakkal).

Hogy próbálhatjuk meg csökkenteni a rengeteg számítást? Egyfelől **korlátozhat-juk r lehetséges értékeinek halmazát**. Az értékeknek r_{min} alsó és r_{max} felső korlátot adva a keresést a két érték közötti sugarú körökre szűkíthetjük. Némi előzetes in-

formáció birtokában (körülbelül, vagy a kép oldalainak arányában mekkora köröket kell keresnünk) jelentősen csökkenthető a számítási idő- és tárigény.

Másfelől pedig felhasználhatunk lokális információkat is: a vizsgálat alatt lévő képpont egy adott ablaknyi környezetét vizsgálva, meghatározhatjuk a körvonali adott pontbeli **gradiensét**. Ez az információ felhasználható a középpont keresésében, ugyanis a kör középpontjának a körvonali pont normálisán kell feküdnie. Így, ha nem is egyetlen kitüntetett irányra, de a számítási pontatlanságot és a zajt figyelembe véve egy szűk tartományra korlátozhatjuk a keresett körközéppontok irányát. Ez a választott tartomány méretével fordított arányosságban csökkenti a szükséges számítások számát. Példának okáért, ha a kiszámított gradiens segítségével akár csak 90 fok pontossággal meg tudjuk határozni a pontban vett normális irányát, a számítások háromnegyedét nem kell elvégezni, ráadásul az akkumuláltortömb sem telítődik feleslegesen olyan paraméterekkel, amelyekből biztosan (vagy elég nagy valószínűséggel) nem fog helyes megoldás születni.

Variációk körkeresésre

A körkeresésre használt Hough-transzformáció további kiegészítéseivel találkoztunk H. K. Yuen *et al* hivatkozott cikkében [14]. A cikkben az előző alfejezetben ismertetett sztenderd változat mellett még további négy módsulat vizsgálatát és ezek összehasonlítását végzik el a szerzők. Ezek közül a cikkben „2-1 Hough-transzformáció” néven hivatkozott módszert emelném ki, a későbbiek során ugyanis ennek fontos szerepe lesz. Elnevezésként a cikkben használt „21HT” rövidítést fogom használni.

A **21HT** módszer a [15] és [16] számon hivatkozott cikkekben volt először használatos. A kiegészítés felhasználja a rendelkezésre álló gradiens-információt (lásd: 3.1.2.), és ennek ismeretében pedig a problémát két részre osztja. Mivel a kör középpontjának a körvonali pontok normálisán kell feküdnie, ezen normálisok közös metszéspontja valójában tehát meghatározza a középpontot. Egy kétdimenziós akkumuláltortömb pedig elég minden pont saját normálisára eső szavazatainak nyilvántartásához. Ezután a sugár meghatározása a következő módszerrel történhet: meghatározuk minden pont és az előző lépésben kiszámított középpont-jelölt távolságát, majd ezekből az információkból egy sugár-hiszrogramot állítunk elő. Ennek vizsgálatával már meghatározhatjuk a középpontokhoz tartozó sugarakat is. A módszer tárigénye az eredeti megközelítéshez képest jóval kisebb, hiszen csak egy **2D akkumulátort** és egy **1D hiszrogramot** kell használnunk – innen a módszer „2-1” elnevezése.

Eredmények tekintetében az összehasonlító cikk szerint a 21HT módszer felveszi a versenyt a sztenderd megoldással. Igaz, hogy a kétfázisú számítás miatt az első fázisban összeszedett hiba szükségszerűen rárakódik a második fázisra, ezt a pontatlanságot ellensúlyozni tudja a módszer jelentősen kisebb tárigénye.

3.1.3. Kiegészítések

A meglévő módszer továbbfejlesztésekor két irányba is elindulhatunk:

1. egyrészt növelhetjük az algoritmus teljesítőképességét,
2. másrészt bővíthetjük a felismerhető formák halmazát.

Ebben a szakaszban minden két lehetséges fejlesztési irány eredményeiről szeretnék röviden beszámolni a témában fellelhető szakirodalom felhasználásával.

Az első irányba mutató fejlesztések közül néhánnyal már találkozhattunk jelen dolgozat keretein belül is. Az 3.1.2. alszakaszban előkerült a gradiensinformáció felhasználása és az előzetes tudás alapján történő megfelelő korlátok bevezetése a számítás gyorsítása végett. Ebben a témában minden képp megemlítendő még a kernel alapú Hough-transzformáció.

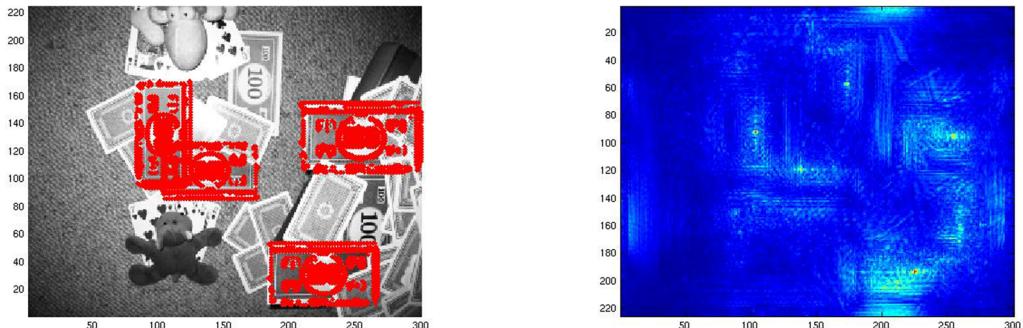
A **kernel alapú megvalósítás** lehetőségét a szerzők – Fernandes és Oliveira – 2008-as cikkükben [17] vetették fel, tehát a módszer meglehetősen friss. Állításuk szerint valósidejű működés érhető el viszonylag nagy képek esetén is a szavazási protokoll továbbfejlesztésének köszönhetően. A módszer egyeneskereséskor az (r, θ) paraméterezésen nem változtat, de nem önmagukban álló pontokat, hanem körülbelül egy irányban álló pixelk klasztereit (csoportjait) veszi figyelembe. minden klaszterben egy megfelelő irányba forgatott elliptikus Gauss-kernellel végzett konvolúció hivatott a csoportra vonatkozó bizonytalanságot modellezni. Ez a megközelítés nemcsak hogy a szavazatok számának csökkentésével képes az algoritmus sebességét növelni, hanem a protokollnak köszönhetően sokkal tisztább akkumulátort is eredményez. A háttérzajtól mentes tömbben pedig jóval könnyebben tudjuk a lokális maximumokat detektálni. Ezzel összességében az eddigieknel gyorsabb és pontosabb egyenesdetektálást tudunk kivitelezni.

Felismerhető formák tekintetében a módszer bővíthető az általános analitikus 2D görbék mellett 3D képeken testek felismerésére. Ezen kívül semmiképp nem hagyhatjuk szó nélkül a Ballard-féle általánosított Hough-transzformációt sem.

Három dimenzióban a **testek felismerése** a két dimenziós esetekhez hasonlóan történik – hasonló buktatókkal és legtöbbször további járulékos memória- és számításigénnel. Síkoknál például az egyenesekhez hasonlóan a megszokott reprezentáció nem használható függőleges síkok keresésére. A megoldást ebben az esetben a gömbi koordinátarendszerre való átállás jelenti, ahol a sík már normálvektorával és az origótól való távolságával jellemzhető (a paramétertér tehát három dimenziósra adódik). Gömbök, hengerek, ellipszoidok keresése szintén a két dimenziós esetek tapasztalatainak felhasználásával történhet. Az új, akár térbeli formák keresése kombinálható az eddig megismert teljesítménynövelő eljárásokkal: a már megismer eljárások használhatók a keresés során, természetesen adott esetben három dimenzióra vonatkoztatva azokat.

Dana H. Ballard általánosított transzformációja [13] – amint az már jelen dolgozat keretein belül is előkerült – lehetővé teszi modelljükkel reprezentált általános objektumok felismerését a **mintafelismerés** alapelveit kihasználva. A modell előfordulásainak keresése a képtérben – ahogy Ballard megmutatta – szintén megoldható paraméterek akkumulálásával. Válasszuk ezen paramétereknek a modellt a képtérbe átvivő transzformáció (vagy transzformációk) paramétereit! Például ha csak a modell pozícióját keressük, akkor minden össze eltolási paramétereket kell figyelembe vennünk, ezek akkumulálásával a megszokott módon és eredményességgel ismerhetjük fel az adott objektum helyzetét. Azonban a módszer a transzláció (eltolás) invariancia mellett rotáció (forgatás) és skálázás (méret) invariánssá is tehető, igaz a paramétertér dimenziószámának növelése árán. Láthatjuk, hogy a mintafelismerés és a szavazási mechanizmus előnyeinek ötvözésével ez az eljárás igazán komoly

fegyver lehet a képfeldolgozási eszköztárunkban.



3.5. ábra. Kép- és paramétertér az általánosított Hough-transzformáció használata közben.

Forrás: <http://href.hu/x/c91m>

3.1.4. Összegzés

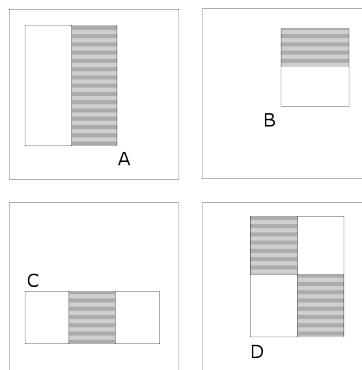
Az eddigiek alapján látszik, hogy a transzformáció felhasználhatóságának szűk keresztmetszetét leginkább a nagy számításigénye adja. Ez egyben legfőbb **hátránya** is: a számításigény a paramétertér dimenziószámának, vagy a kép méretének növekedésével egyre csak növekszik. A dimenziók száma tehát korlátot ad a transzformáció gyakorlati felhasználhatóságának, ezért eredeti formájában leginkább csak egyenesek, vagy körök keresésére használják. A körök keresésének lehetősége azonban kielégítheti a pupillakövetési probléma által támasztott követelményeket. A követés során **előnyére** válhat, hogy a szavazási mechanizmus használata miatt meglehetősen zajos képeken is képes lehet a pupillakontúr megbízható felismerésére. Nem mesterségesen előállított tesztesetekben – hiszen pupillakövetés esetén csak ennek van értelme – pedig ez korántsem elhanyagolható szempont.

3.2. Objektumdetektálás és -követés

+++ kis bevezető +++

3.2.1. A Viola–Jones objektumdetektor

A Paul Viola és Michael Jones által 2001-ben elővezetett [18] Viola–Jones objektumdetektor az első olyan objektumfelismerő rendszer, megközelítheti, vagy akár teljesítheti is a valósidejű feldolgozás által támasztott követelményeket. A rendszer eleinte arcdetektálás céljából készült, de mint kiderült, működése könnyen általánosítható, így megfelelő tanítás után bármilyen objektum felismerésére képes lehet.



3.6. ábra. A Viola és Jones által használt jellemzőtípusok.

Forrás: [18]

Az osztályozó úgynevezett *jellemzőkkel* (features) dolgozik, amelyek téglalap alakú területeket alapul véve a bennük lévő képpontok összegét jelentik. Ebben a formában a jellemzők rokonságot mutatnak a Haar bázisfüggvényekkel, amelyek az objektumdetektálásban korábban meghatározó *wavelet transzformáció*nál használatosak. Lehetséges jellemzőtípusokat mutat be a 3.6. ábra.

A jellemző-alapú, úgynevezett *integrális* képreprezentáció esetén az egyes jellemzők ugyan nagyon egyszerűek, viszont konstans időben kiértékelhetők. A jellemzők gyors értékelhetősége azonban nem kompenzálja nagy számukat. minden egyes területre minden jellemzőt kiértékelve csökkenne a rendszer használatával nyert előny. Ennek kiküszöbölésére a betanítási fázisban a Viola–Jones detektor az AdaBoost [19] eljárás egy módosított változatát alkalmazza, amely segít kiválasztani a leginkább fontos jellemzőket, valamint korlátokat ad a kész osztályozó általánosító képességére.

Ha csak az AdaBoost eljárás által kiválasztott fontos jellemzőket értékeljük ki, a rendszer alapesetben akkor sem képes a valós idejű osztályozásra. Ennek kivédésére a tanítási folyamatban az egyes elemi osztályozókat egymás után kötik (kaszkádosítják), és minden osztályozó bemenetére csak azok a minták jutnak, amelyeket a sorban előtte lévő összes osztályozó elfogadott.

3.2.2. A Lucas–Kanade optikai áramlás eljárás

A számítógépes látás területén az optikai áramlás közelítésének kérdése fontos kutatási terület, ennek megfelelően a problémára számos különböző megoldás született.

A Bruce D. Lucas és Takeo Kanade által 1981-ben nyilvánosságra hozott [20] differenciális algoritmus manapság az egyik legszélesebb körben használt módszer optikai áramlás számításakor.



3.7. ábra. A kép jobb oldalán piros nyílak jelképezik az optikai áramlást.
Forrás: <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/dsz36>

Az eljárás feltételezi, hogy az áramlás konstans a vizsgált képpont helyi környezetében, és ebben a környezetben (ablakban) a legkisebb négyzetek módszerével próbálja kiszámolni az aktuális pont elmozdulásvektorát. Azzal, hogy nem egy-egy képpontot, hanem egy kis lokális ablakot vesz figyelembe a számítás során, a Lucas–Kanade eljárás kevésbé érzékenyen reagál a zajos képekre. Másrészt viszont a lokális tulajdonság hatására az eljárás nem tud információt szolgáltatni a kép nagy, összefüggő, azonos intenzitású területein.

Matematikai háttér

Tegyük fel, hogy két egymás követő időpillanatban a képek közti eltérés megfelelően kicsi. Az optikai áramlás eljárás alapegyenlete ebben az esetben következő

$$I_x V_x + I_y V_y = -I_t \quad (3.7)$$

formában írható fel, ahol V_x és V_y az (x, y, t) képpont sebességének (vagyis optikai áramlásának) x és y koordinátái, I_x , I_y és I_t pedig a kép parciális deriváltjai.

A Lucas–Kanade eljárásban egy, a vizsgált képpont körüli ablak tartalmát vesszük figyelembe, és feltesszük, hogy az áramlás ezen a régióban belül állandó. A (3.7) egyenletet ennek megfelelően a következő formára hozhatjuk

$$\begin{aligned} I_x(q_1)V_x + I_y(q_1)V_y &= -I_t(q_1) \\ I_x(q_2)V_x + I_y(q_2)V_y &= -I_t(q_2) \\ &\vdots \\ I_x(q_n)V_x + I_y(q_n)V_y &= -I_t(q_n) \end{aligned} \quad (3.8)$$

amelyben q_1, q_2, \dots, q_n az aktuálisan vizsgált pont körüli ablak egyes képpontjai. A (3.8) egyenletet $Av = b$ formában, mátrixokkal is felírhatjuk, ekkor

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} I_x(q_1) & I_y(q_1) \\ I_x(q_2) & I_y(q_2) \\ \vdots & \vdots \\ I_x(q_n) & I_y(q_n) \end{bmatrix} \\ v &= \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \\ b &= \begin{bmatrix} -I_t(q_1) \\ -I_t(q_2) \\ \vdots \\ -I_t(q_n) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.9}$$

A (3.9)-ban definiált egyenletrendszer felülhatározott, vagyis több egyenlet szerepel benne, mint ismeretlen. A Lucas–Kanade algoritmus a legkisebb négyzetek módszerével számítja ki a sebességek komponenseket, vagyis

$$v = \frac{A^T b}{A^T A} \tag{3.10}$$

ami (3.9)-at behelyettesítve a következő alakra hozható

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n I_x(q_i)^2 & \sum_{i=1}^n I_x(q_i)I_y(q_i) \\ \sum_{i=1}^n I_x(q_i)I_y(q_i) & \sum_{i=1}^n I_y(q_i)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^n I_x(q_i)I_t(q_i) \\ -\sum_{i=1}^n I_y(q_i)I_t(q_i) \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

vagyis az aktuálisan vizsgált q_1, q_2, \dots, q_n pontokat tartalmazó ablak p középpontjának x és y irányban vett sebességek komponenseit adja meg közvetlenül a (3.11) egyenlet.

3.2.3. Összegzés

A 3.2.1. szakaszban felsorolt eljárásoknak köszönhetően a Viola–Jones objektumdetektor képes az elődeinél jóval gyorsabban osztályozni a bemenetére küldött képeket. Ha azonban nem is lehetséges a videofolyam minden egyes képkockáján a rendelkezésre álló időn belül önállóan döntést hozni, valamilyen kiegészítő technika használatával (pl. a felismert objektumok optikai áramlás-alapú követése) *valós idejű* objektumdetektáló rendszer létrehozása válik lehetővé.

A Lucas–Kanade optikai áramlás-alapú követés jó kiegészítésként szolgálhat egy nagyobb számításigényű objektumdetektor mellé. Azonban a használat során a két módszer egymáshoz viszonyított ideális összetételének megtalálása döntő a követés pontossága és gyorsasága szempontjából.

3.3. Blob-műveletek

A képfeldolgozásban a *blob* fogalmat a szó „folt” értelmében használják, nem keverendő össze az adatbázisok BLOB (Binary Large Object – nagy bináris objektum) fogalmával. Egy *blob* informálisan a következő módon definiálható:

1. Def. *A képtér valamely tulajdonság egyezősége, vagy korlátozott mértékű eltérése alapján összetartozó régióját blob-nak nevezzük.*

A definícióban említett tulajdonság a gyakorlatban legtöbbször a képpontok színe vagy intenzitása. Azonban más, nem RGB színtérben reprenzentált képek esetén egyéb tulajdonság szerinti összetartozás is hasznos információt hordozhat (pl. a HSV színtérben vett szaturáció).

A szakirodalomban két eljárást tartanak számon a blob-ok meghatározásával kapcsolatban. A **blob-detektálás** (blob detection) differenciális vagy lokális szélsőértékeken alapuló metódusok segítségével keresi a képtér érdekes pontjait, legszélesebb körben a *Laplacian of the Gaussian (LoG)* operátort használva. A blob-detektálás olyan további információkat szolgáltathat az él- és sarokdetektáló algoritmusok mellett, amelyek elősegíthetik a kép feldolgozását illetve megértését, teret pontosabb nyitva objektumfelismerési és -követési módszerek fejlesztésének.

A blob-detektálással rokon, de attól független eljárás a **komponens-címkézés**. A módszer több néven is ismert, pl. régió-címkézés, blob-címkézés, komponens-analízis. A gépi látás terén komponens-címkézésen legtöbbször két dimenziós bináris képek összetartozó régióinak – ezek a blob-ok – felkutatását és elkülönítését értjük, de a későbbiekben bemutatott elvek kiterjeszthetők szürkeárnyalatos vagy színes képek, illetve akár többdimenziós adathalmazok elemzésére is.

Munkám során a bináris képek feldolgozása került előtérbe, ennek megfelelően a továbbiakban a címkézással kapcsolatos elméleti alapokat foglalom össze. A 3.3.1. szakaszban a címkézási algoritmusokat ismertetem, majd a 3.3.2. szakaszban áttekintem azokat a jellemzőket, amelyek hasznosnak bizonyulhatnak a blob-ok osztályozása és szűrése során.

3.3.1. Komponens-címkézés

Az egyszerűség kedvéért a komponens-címkézés alapelveit két dimenziós képek esetén mutatom be. Könnyen belátható, hogy a későbbiekben ismeretett módszerek egyszerűen kiterjeszthetők többdimenziós halmazok címkézésére is – természetesen az idő- és tárigény növekedése mellett.

A címkézés megkezdése előtt minden esetében fontos, hogy megszabjuk a használni kívánt **szomszédosság-mértéket**. Ez a címkézés során a legtöbbször 4- vagy 8-szomszédosságot jelent. A **4-szomszédossági** esetben egy pixel szomszédait a tőle N , W , S és E irányban lévő képpontok jelentik az égtájak angol elnevezései alapján. **8-szomszédosság** használatakor a képponthoz csak a sarkával illeszkedő pontokat is szomszédnak vesszük, tehát az óramutató járásával ellentétes irányban N , NW , W , SW , S , SE , E és NE szomszédokról beszélhetünk.

A feladat tehát olyan algoritmust találni, amely lehetőleg minél kisebb számítási komplexitással képes adott szomszédosság-mérték mellett elkülöníteni képeken az összetartozó régiókat.

Kétlépéses algoritmusok

A kétlépéses (two-pass) algoritmusok – nevükből adódóan – két különálló lépésben határozzák meg a bináris képen található összefüggő blob-okat.

1. Első lépésben **átmeneti címkék** kiosztására, valamint az átmeneti címkék közti ekvivalenciák meghatározására kerül sor.
2. Második lépésben már meghatározhatjuk a komponenseket a korábban ekvivalensnek jelzett címkék **összevonásával**.

Rosenfeld–Pfalz A klasszikus algoritmus [21] minden lépésben sorra veszi a képtér pontjait balról-jobbra, majd fentről lefelé haladva. Ebben a konfigurációban az összetartozását az aktuálisan vizsgált képpontra

- 4-szomszédosság esetén az N és W szomszéd,
- 8-szomszédosság esetén az NE , N , NW és W szomszédok

vizsgálatával döntjük el. Az algoritmust 4-szomszédosságot feltételezve ismertetem.

Az **első lépés** során az algoritmus minden képpont esetén a következő négy feltétel vizsgálatát végzi el, és az eredménynek megfelelően látja el a pontot átmeneti címkével. Egy feltétel teljesülése esetén a vizsgálat leáll, egyébként a következő feltétel vizsgálata következik.

Bár egyértelműnek tűnik, de érdemes megjegyezni, hogy az algoritmus leírásában megkülönböztetjük a képpontok **értékét** (bináris képek esetén a hátteret figyelmen kívül hagyva ez egyetlen értéket jelent), valamint a hozzájuk rendelt **címkét**!

Az éppen vizsgálat alatt lévő pontot jelölje P , a képpont értékét megadó függvényt v , a címkézést definiáló függvényt pedig c . A régiók címkéit jelöljük növekvő pozitív egész számokkal.

1. feltétel: $v(P) = v(W)$
 W szomszéd értéke megegyezik a vizsgált pont értékével.
 - $c(P) := c(W)$
 Mindenképpen azonos régióban vagyunk, alkalmazzuk P -re W címkéjét!
2. feltétel: $v(W) = v(N)$ és $c(W) \neq c(N)$
 W és N szomszéd értéke megegyezik, de címkéjük különböző.
 - $c(P) := \min\{c(W), c(N)\}$
 A két szomszédnak nyilvánvalóan egy régióba kellene tartoznia. Alkalmazzuk a kisebbik címkét, és **jegyezzük fel a címkék ekvivalenciáját!**

3. feltétel: $v(W) \neq v(P)$ és $v(N) = v(P)$

W értéke különbözik, de N értéke megegyezik vizsgált pont értékével.

- $c(P) := c(N)$

Alkalmazzuk az N szomszéd címkéjét!

4. feltétel: $v(W) \neq v(P)$ és $v(N) \neq v(P)$

W és N értéke különbözik P értékétől.

- $c(P) := \max\{c\} + 1$

Készítsünk egy új címkét és alkalmazzuk!

A **második lépésben** az algoritmus újra végigiterál a képpontokon, és minden képpont címkéjét az ekvivalensnek jelzett címkék közül a legkisebb helyettesíti.

A megvalósítás során az algoritmus *diszjunk-halmaz erdő* (disjoint-set) adatszerkezetet használ, amely ideális a régiók közti ekvivalenciák tárolására és elérésére.

Lifeng-Yuyan-Suzuki A szerzők által 2008-ban prezentált algoritmus [22] a klasszikusnál gyorsabb feldolgozást tesz lehetővé. Az előzőekhez hasonlóan itt is két lépésben iterálunk végig a képen balról-jobbra, fentről-lefelé, a háttérhez tartozó képpontokat figyelmen kívül hagyva.

Az **első lépés** során elvégzendő feladatok az aktuális képpontra:

1. Vizsgáljuk a képpont szomszédait, a szomszédosság-mértéknek megfelelően!
2. Ha nincsenek szomszédok (mind a háttérhez tartozik), rendeljünk új címkét az elemhez és folytassuk az algoritmust a következő képponttal!
3. Ha vannak szomszédok, címkézzük a képpontot a legkisebb szomszédos címkével!
4. Tároljuk a szomszédos címkék közti ekvivalenciákat!

A **második lépésben**, hasonlóan az előző megoldáshoz, a képpontokat újra sorba véve újracímkézzük azokat az ekvivalens címkék legkisebbikével.

Egyéb algoritmusok

A komponens-címkézés problémájára a 3.3.1. szakaszban taglaltakon kívül is számos más megoldás született. Léteznek a feldolgozást összevonó egylépéses (one-pass) algoritmusok, de olyan többlepéshes (multi-pass) algoritmust is kifejlesztettek már, amely lineáris komplexitással oldja meg a feladatot. [23]

Az egyesével, szinte egymástól függetlenül vizsgált képpontok feldolgozása párhuzamosításért kiált: párhuzamosított komponens-címkéző algoritmusok fejlesztésére is sor került [24], és a téma továbbra is nagy érdeklődésre tart számot a párhuzamosított számítási platformok (pl. CUDA, OpenMP) előretörésével.

3.3.2. Blob-analizis

Sok esetben a képen felismert blob-ok nem mindegyik tartalmaz a feldolgozás szempontjából hasznos információt. A blob-ok algoritmikus megtalálása mellett szükséünk lehet a foltok által hordozott absztrakt információ megértésére is. A feladat elvégzéséhez hasznunkra válhat olyan mértékek meghatározása, amelyekkel **szűrni tudjuk** a felismert blob-okat valamely előre definiált kritérium alapján.

A pupillakeresési feladatnál például az ember számára könnyen feldolgozható „*keressünk egy relatíve nagy, kör alakú objektumot*” feltételt kell a gépi látás által is megoldható problémává formalizálni.

Nem feltétlenül kell azonban rögtön komplex mértékek felhasználásába bonyolódnunk. Jól megfogalmazott kritérium esetén sokszor a legegyszerűbb jellemzők is segítségünkre lehetnek: legyen szó akár egyszerű zajszűrésről, vagy a feldolgozás szempontjából fontos blob-ok azonosításáról.

Az egyszerűbb mértékek közé tartoznak az objektum kiterjedésével és kerületével kapcsolatos jellemzők.

- **terület**

- objektum területe
- lyukak száma és területe
- teljes terület
(objektum plusz lyukak területe)

- **kerület**, vagyis a kontúr hossza

- **befoglalók**

- befoglaló keret (bounding box)
(pl. két ellentétes sarok megadásával)
- elforgatott befoglaló keret
(pl. középpont, szélesség/magasság valamint irányszög megadásával)
- konvex héj (convex hull)
(pontjai megadásával)
- befoglaló ellipszis
(pl. középpont, kis-, nagytengely, irányszög megadásával)

A blob-ok képen belüli elhelyezkedésének meghatározásakor lehet hasznos a blob **súlypontjának** meghatározása.

2. Def. *Súlypont: $x_m = \frac{\sum_{i=1 \dots N} x_i}{N}$ és $y_m = \frac{\sum_{i=1 \dots N} y_i}{N}$, ahol N a blob-hoz tartozó képpontok száma*

A szabályos formáktól való eltérés mértékét határozhatsuk meg a **kompaktság** definiálásával. Jelölje P a kerületet, A a területet, valamint W és H a befoglaló téglalap szélességét és magasságát.

3. Def. *Kompaktság 1:* $\frac{P^2}{A} \Rightarrow$ diszkre minimális

4. Def. *Kompaktság 2:* $\frac{A}{W \cdot H} \Rightarrow$ téglalapra minimális

A befoglaló keret (bounding box) szélesség/hosszúság aránya az objektum általá-
nosságban vett **elnyújtottságáról** ad információt.

5. Def. *Elnyújtottság:* $\frac{W}{H}$

Az objektum **körkörösséget** (Heywood Circularity Factor) is könnyen definiál-
hatjuk a kerület és a terület felhasználásával. A képlet tökéletesen kör alakú objek-
tumra 1 értéket ad vissza.

6. Def. *Körkörösségeg:* $\frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$

A blob orientációjának meghatározásában lehet segítségünkre a **Feret-átmérő** fogalma. Az általános definíció szerint Feret-átmérőn azt a értéket értjük, amely távolságba az objektum „beszorítható” a megadott iránytalálkozásával. A fogalom legkönnyebben úgy szemlélethető, mintha az objektumot egy to-
lómérő adott irányba álló pofái közé szorítanánk. A tolómérőn leolvasott érték az objektum mérési irányra vett Feret-átmérője – ebből származik a másik, főleg angol-
szász területen elterjedt elnevezés, a *caliper diameter* (caliper: tolómérő, tolómérce).

A gépi látás területén Feret-átmérőn általában automatikusan a legnagyobb Feret-
átmérőt értjük. A legnagyobb Feret-átmérő iránytól függően használhatjuk a blob **orientációjának** jellemzésére.

3.3.3. Összegzés

asdf

4. fejezet

Technológia

+++ bevezeto a fejezethez +++

4.1. Az OpenCV könyvtár

Az **OpenCV**¹ egy nyílt forráskódú gépi látás (computer vision) könyvtár. Elsődleges célja, keretet nyújtani **valósidejű** képfeldolgozási alkalmazások fejlesztésére. A könyvtár szabadon letölthető és felhasználható a BSD licenc² keretein belül.

Az OpenCV projekt hivatalosan 1999-ben indult az Intel kezdeményezésében. A nagyközönségnek a 2000. évi „*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*” konferencián mutatkozott be, majd öt béta-verziót követően 2006-ban jutott el az 1.0-ás hivatalos kiadásig. A fejlesztése itt úgy tűnt, hogy megáll, de végül a projektet a Willow Garage³ robotikai kutatólabor vette szárnyai alá. Az ő irányításuk alatt 2008 októberében elkészült az 1.1-es verzióval közel egy időben látott napvilágot az első hivatalos OpenCV-vel foglalkozó könyv „*Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*” címmel Gary Bradski és Adrian Kaehler fejlesztők tollából [25]. Az egy évvel később, 2009 októberében megjelent 2.0-ás verzióval a projekt nagy fejlődésen esett át. Ebben a verzióban található meg először a C++ és Python interfész (ez a meglévő C mellett már három hivatalosan fejlesztett interfész jelentett), amely az egyszerűbb kezelhetőség, új függvények mellett a meglévő eljárások teljesítmény tekintetében – különösen többmagos rendszereken – jobb implementációját kínálta a felhasználóknak.

A projekt életében a következő mérföldkő 2012 augusztusa volt. Ekkor az OpenCV támogatását és fejlesztését az erre a célra alapított *OpenCV.org* non-profit alapítvány vette át. A 2.5-ös verzió kiadásával tovább bővült a támogatott programozási nyelvek listája: innentől már a Java és a MATLAB/OCTAVE is felkerült az elérhető interfések listájára. Nem hivatalos támogatással, de további wrapper-ek is elérhetők a könyvtárhoz, például C# vagy Ruby nyelven, ezzel is elősegítve a széleskörű elterjedését.

Az elmúlt években a GPU-gyorsítás támogatása terén is komoly előrelépésekre került sor. 2010 szeptemberétől érhető el a CUDA, 2012 októberétől pedig az OpenCL

¹<http://opencv.willowgarage.com/>

²<http://www.1info.org/bsdlicense.html>

³<http://www.willowgarage.com/>

interfész.

A fejlesztést különboző platformokra párhuzamosan (cross-platform) történik. Mivel a könyvtár alapvetően a C nyelvre épül, ezért a számos platformon működésre bírható. A dolgozat írásának idején elérhető 2.5-ös stabil verzió a következő operációs rendszerekre elérhető:

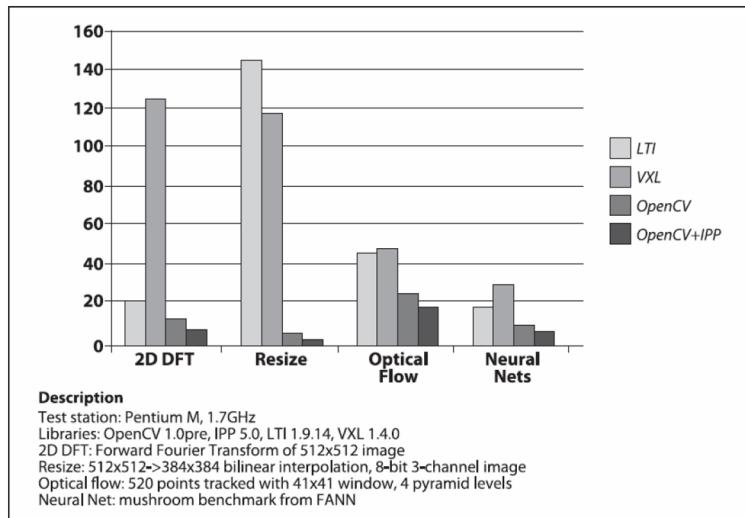
- asztali (desktop) rendszerek
 - Windows
 - Linux
 - OS X
 - OpenBSD
 - FreeBSD
- mobil operációs rendszerek
 - iOS
 - Android
 - BlackBerry 10
 - Maemo

Az OpenCV jelenleg elérhető 2.5-ös verziója széles körben, mondhatni világszerte használt, felhasználói tábora több, mint 40 000 főt számlál. Köszönhető ez többek között annak, hogy felhasználási lehetőségei igencsak sokrétűek: több, mint 500 optimalizált algoritmust kínál annak érdekében, hogy „ne kelljen újra feltalálnunk a kereket”. Sebesség tekintetében érződik a kipróbált, optimalizált algoritmusok használata: az OpenCV a jelenleg elérhető leggyorsabb alternatíva gépi látás terén (4.1. ábra). Teljesítménye azonban adott esetben még tovább növelhető, mivel ha Intel IPP⁴ (Integrated Performance Primitives) támogatást észlel, az abban található szálakra optimalizált algoritmusok használatát fogja preferálni.

A teljes funkcionális részletekbe menő bemutatása – mint láthattuk [25] – egy könyvet is megtölt, de a teljesség igénye nélkül tekintsük át, hogy milyen alapvető jellemzői és alkalmazásai vannak a környezetnek:

- alap adatstruktúrák
 - mátrixok, vektorok
- mátrix és vektor manipuláció, lineáris algebra
- dinamikus adatstruktúrák
 - listák, sorok, halmazok
 - gráfok és fák

⁴<http://software.intel.com/en-us/intel-ipp/>



4.1. ábra. Az OpenCV teljesítménye az LTI és VXL képfeldolgozási könyvtárakkal összehasonlítva.
Forrás: [25]

- kép és videó input/output
 - beolvasás fájlból (kép vagy videó) és kameráról
 - kiírás lehetőség képként vagy videóként
- előfeldolgozás
 - él- és sarokkeresés
 - mintavételezés és interpoláció
 - színkonverzió
 - morfológiai operátorok
- struktúraanalízis
 - távolság- és Hough-transzformáció
 - kontúrfeldolgozás
 - sablonillesztés
 - különböző momentumok
 - Delaunay háromszögelés
- kamerakalibráció
 - kalibrációs mintázatok felismerése és követése
 - fundamentális mátrix becslés
 - homográfia becslés
 - sztereó megfeleltetés
- mozgásanalízis

- optical flow
- mozgásszegmentálás és -követés
- objektumfelismerés
 - eigen-módszerek
 - rejtett Markov-modell (Hidden Markov Model – HMM)
- GUI és rajzolás
 - kép és videó megjelenítés
 - billentyűzet és egérkezelés
 - egyenes, kör, poligon, szöveg rajzolása

Láthatjuk, hogy a fent felsorolt funkciókkal a gépi látás terén rengeteg egyszerűbb feladatot szinte „egy lépésben”, beépített, optimalizált eljárások segítségével oldhatunk meg. Ha nagyobb szabású projektbe kezdünk, akkor is hasznunkra lehet, hogy részben vagy egészében egy több tízezres felhasználói tábor (melynek jelentős részét aktív kutatók alkotják) visszajelzései alapján fejlesztett környezetre építhetjük munkánkat.

Az OpenCV régebbi verzióiban a számos előny mellett hátrányként volt megemlítető, hogy segítségével a felhasználói felületet csak nagyon leegyszerűsített módon szabhattuk testre. Igaz, hogy a könyvtár feladata elsősorban a képfeldolgozás és nem a megjelenítés, így ebből a nézőpontból a beépített kép és videó megjelenítési lehetőség, billentyűzet- és egérkezelés valamint trackbarok (csúsztatható kezelőszerv értékek beállítására) létrehozásának lehetősége inkább hozzáadott értékként jelent meg, azonban ez nem változtat azon a tényen, hogy ha igény van felhasználóbarát kezelőfelület készítésére, az OpenCV-t mindenképpen integrálnunk kellett valamely elterjedt grafikus felhasználói felület toolkittel.

A X.X verziótól kezdődően megjelent egy némileg fejlettebb Qt alapú felhasználói felület. Teljes szabadságot még ez sem ad a felületek kialakításában, de az egyszerűbb projektek kezelőszerveinek és megjelenítésének problémája már kielégítően elvégezhető egyéb eszköz használata nélkül.

4.2. A Qt keretrendszer

A **Qt** (ejtsd az angol „cute” szó mintájára: kjút) keretrendszer egy széles körben használt szoftver, amelyet egyrész grafikus felhasználói felületek (Graphical User Interface – GUI), másrész pedig parancssoros (Command Line Interface – CLI) alkalmazások feljegyzésére is használnak. A grafikus felhasználói felületek fejlesztése során a Qt úgynevezett widget-toolkitként funkcionál – kis, önálló elemek (widgetek) felhasználását és összekötését teszi lehetővé, ezek összességeből áll össze az elkészült grafikus felület. A szoftver a GPL v3⁵ illetve LGPL v2⁶ licencek szerint szabadon elérhető.

⁵TODO

⁶TODO

A keretrendszer egyik nagy előnyének számít más rendszerekkel összehasonlítva, hogy a grafikus felületek kirajzolásakor minden operációs rendszeren igyekszik az elérhető natív elemeket használni, ennek köszönhetően (a natív kirajzolásokból származó nagyszerű performancia mellett) a Qt-vel fejlesztett alkalmazások semmelyik platformon nem tűnnek rendszeridegennek.

A Qt projekt első hivatalos kiadása a Nokia *Qt Development Frameworks* csoporthoz égisze alatt látta meg a napvilágot, miután a finn mobilgyártó felvásárolta a technológiát a norvég Trolltech vállalattól. Ennek megfelelően a kezeti években az asztali platformok mellett leginkább a Symbian operációs rendszer támogatása jelentette a fő csapásirányt. A Nokia azonban 2011-ben szakított saját fejlesztésű operációs rendszerével, és a további bizalmát a Microsoft akkori és elkövetkező mobilplatformjába (Windows Phone 7, majd 8) fektette.

Ezt követően a Nokia megvált a rendszer jogaitól, és azok a Digia⁷ vállalathoz kerültek, amely azóta is a projekt karbantartója, bár a tényleges fejlesztői munka nagy részét továbbra is a Nokia mérnökei végzik. A tranzakció után az új tulajdonos közvetlen célnak tűzte ki, hogy aktualizálják a Qt által támogatott platformok listáját az időközben népszerűvé vált rendszerekkel.

A dolgozat írásakor támogatott fontosabb operációs rendszerek:

- Windows (XP és 7)
- OS X
- Linux, FreeBSD, OpenBSD
- iOS
- Android
- QNX (BlackBerry 10)

A Qt-ot használó alkalmazások programozási nyelve alapvetően a sztenderd C++, a *Meta Object Compiler* (moc) kódgenerátorral kiegészítve, amely számos beépített makróval teszi könnyebbé a fejlesztést. Több más programozási nyelv is használható az ún. kötések (bindings) használatával. A Qt 4-es verziójához elérhető kötések listája a teljesség igénye nélkül:

- TODO
- TODO
- TODO

A Qt 4-es verziójához nagyjából 6 éven át érkeztek a kisebb/nagyobb frissítések, egészen a 4.8-as kiadásig. Ezt követően a koncepcionális változásokat hozó **Qt 5** feljlesztése folytatódik tovább. Az 5-ös verzió funkciói között között a hardveres

⁷TODO

gyorsítású megjelenítés, a QML⁸ és a JavaScript támogatása jelentik a legfontosabb újdonságokat.

A Qt 5 kiadásával a keretrendszer tett egy lépést a nyílt (open source) fejlesztés irányába: a **Qt Project**⁹ néven futó projektbe már külsős fejlesztők is delegálhatják javításaikat vagy új funkciókat, amelyeket a Digia és a Nokia csapata elbírál, és ha megfelelőnek találtatnak, bekerülhetnek a soron következő verzióba.

4.2.1. A Qt Creator fejlesztői környezet

4.3. Módosított kamera

+++ kamera infok, LED csere, fenykep +++

⁸TODO

⁹TODO URL

5. fejezet

Kísérlet

+++ bevezeto a fejezethez +++

5.1. Módszerek összehasonlítása

+++ miert BLOB-os keresest valasztottam Hough vagy Optical flow helyett?
+++

5.2. Feldolgozási folyamat

+++ milyen kepfeldolgozasi (elo)feldolgozas kell a detektalashoz? +++

5.2.1. Pupillakövetés

+++ feldolgozasi lepesek a koveteshez +++

5.2.2. Kalibráció, leképezés

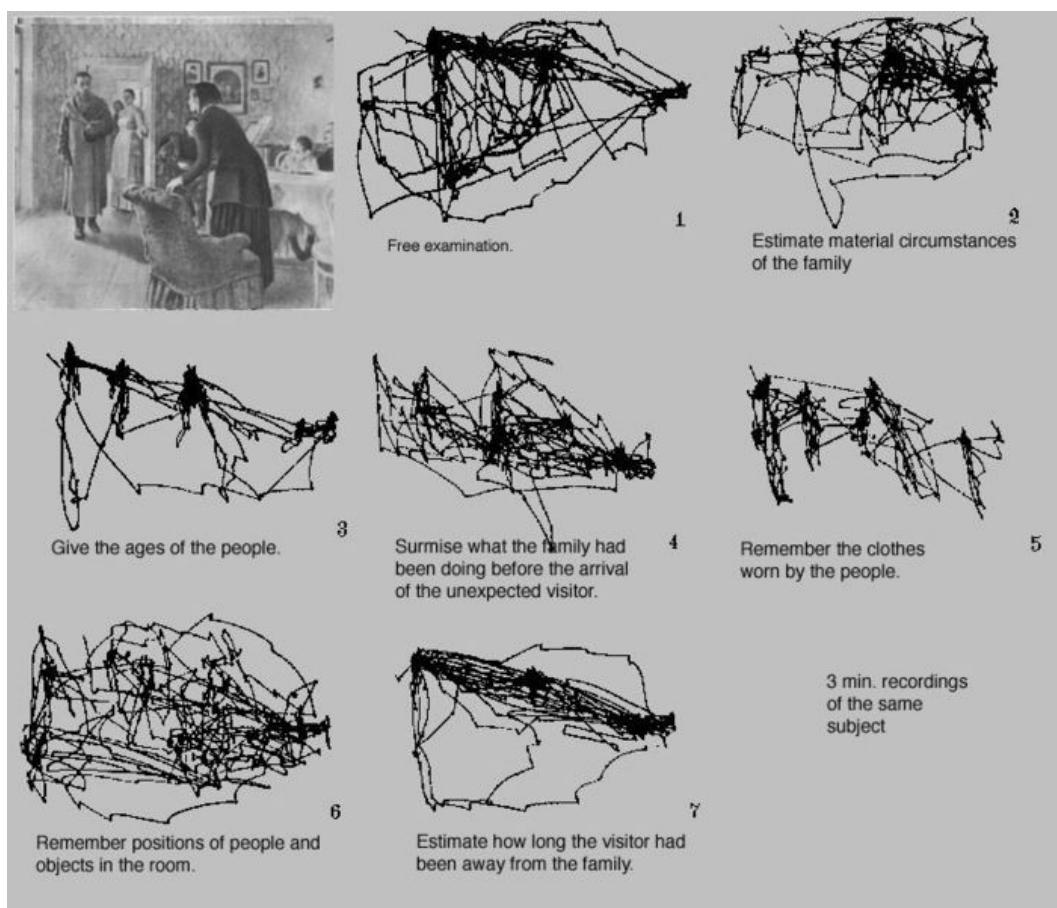
+++ kalibrálás + kepernyo-koordinataba kepzes +++

5.3. Kísérletek

+++ leiras hogy miert ezekkel probaltam ki +++

5.3.1. Pszichológiai bemutató

A rendszer működését úgy demonstráltam, hogy végrehajtottam Alfred L. Yarbus orosz pszichológus 1967-es tanulmánya egy részletét. A kísérletben a kutatók azt bizonyították be, hogy a tesztalanyoknak előzetesen különböző kérdéseket feltéve, a kérdések jelentősen befolyásolták egy kép részleteinek vizsgálatát azzal, hogy a kép csak „szabadon” nézegették azt. A teszteredményeket összefoglaló kép – mint az egyik első a témaival foglalkozó eredmény – jól ismert a tekintetkövetéssel foglalkozók körében, ez látható a 5.1. ábrán.



5.1. ábra. Yarbus '67-es kísérletének eredménye

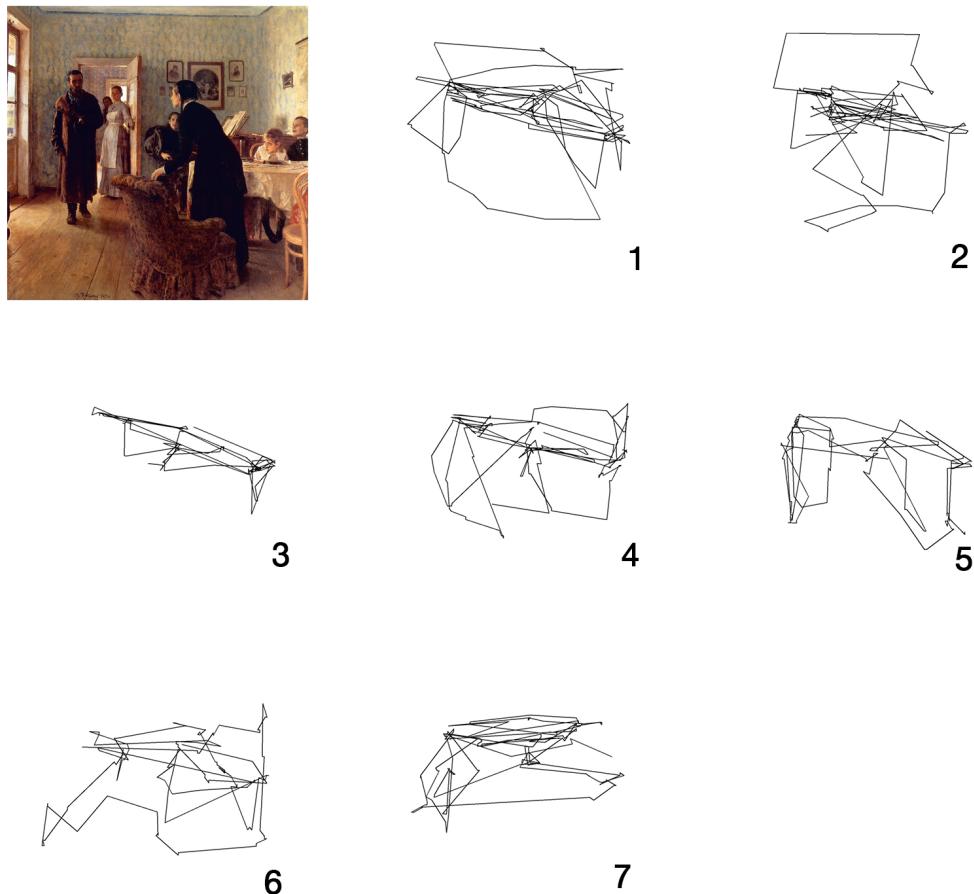
Látható, hogy a kísérlet végrehajtásához szükség volt a tekintet követésére. Ekkor még a kornak megfelelően nem álltak rendelkezésre kifinomult módszerek: az alanyokat egy meglehetősen kényelmetlen acélszerkezethez rögzítve vizsgálták. A bemutató alkalmazásomban arra kerestem a választ, hogy lehetséges-e hasonló méréseket elvégezni az általam fejlesztett rendszerrel.

Az általam tesztelt alanyoknak a következő kérdésekre kellett válaszolniuk a tesztkép (Repin: Váratlan utazó) rövid vizsgálata után. A vizsgálatot minden kérdésben 200 beérkezett érvényes mérési pontig folytattam, ez a felhasznált webkamera, illetve a feldolgozási sebesség mellett nagyjából kérdésenként 15–20 másodpercet vett igénybe.

1. szabad nézelődés
2. „Milyen anyagi körülmények között él a család?”
3. „Adja meg az egyes szereplők életkorát!”
4. „Mit csinálhattak a szereplők, mielőtt az utazó betoppant?”
5. „Milyen ruhát viselnek a kép szereplői?”
6. „Próbáljon megjegyezni minél több strukturális részletet (személyek, tárgyak pozíciója)!”

7. „Mennyi ideig lehetett távol az utazó a családtól?”

A kérdésekre nem volt jó, vagy rossz válasz, a kísérlet minden alanynál csak a feladatnak megfelelő figyelmi területek változását vizsgálja. A vizsgálatom eredménye a 5.2. ábrán követhető.



5.2. ábra. *Eredmények a saját rendszerrel*

Látható – bár ez nem volt feltétel – hogy a mérési eredmények ezen alany esetén meglehetősen jól fedik Yarbus tesztalanyának eredményeit. Az viszont mindenképpen kijelenthető, hogy szignifikáns különbség van az ábra első (szabad nézelődés), valamint többi része között. Nem célom a kísérlet pszichológiai eredményeit értékelni, az viszont bizonyos, hogy a rendszer hasonló kísérletek elvégzését támogatja.

5.3.2. Webergonómiai bemutató

Ahogyan dolgozatom első fejezetében már említettem, a tekintet követése a webergonómia területén is fontos kísérletek elvégzésére ad lehetőséget. A rendszer ilyen irányú képességeit demonstrálandó, elkészítettem az pszichológiai kísérlet adatait hőterképen (heat map) megjelenítő funkciót is, ennek eredménye egy tesztképre a 5.3. ábrán látható.



5.3. ábra. Hőterképes megjelenítés a pszichológiai teszt egy adathalma-
zára („Adja meg a szereplők életkorát!”)

Minden vizsgálatban célszerű a lehető leginkább informatív megjelenítést választa-
ni a rendelkezésre álló adathalmaz alapján. A képen egyre pirosabb színnel jelöltetem
a kép frekventáltan vizsgált területeit, például egy webergonómiai vizsgálatban az
adatok effajta vizualizációja lehet a legcélszerűbb.

+++ meg 1-2 bekezdés +++

5.4. Összefoglalás

+++ osszefoglalás a kísérletekről +++

6. fejezet

Megvalósítás

+++ bevezeto a fejezethez +++

+++ melyik szakaszban mi van +++

6.1. Architektúra

+++ altalanos felepités, osztalydiagram, stb. +++

6.1.1. A Class1 osztaly

+++ interfesz, mit csinal, stb +++

6.1.2. A Class2 osztaly

+++ interfesz, mit csinal, stb +++

6.1.3. A Class3 osztaly

+++ interfesz, mit csinal, stb +++

6.2. Felhasználói felület

+++ leiras + kepek a felhasznalo feluletrol +++

6.3. Felhasználói dokumentáció

+++ az alkalmazas pontos hasznalata (tobb monitor, stb) +++

6.4. Tesztelés, eredmények

+++ tesztelelesi dokumentacio (ide mit?) +++

Értékelés

+++ altalanos ertekeles ide +++

Köszönetnyilvánítás

+++ koszonetnyilvanitas ide +++

Irodalomjegyzék

- [1] Ragó Anett Csépe Valéria, Győri Miklós. *Általános pszichológia I. – Észlelés és figyelem*. Osiris, Budapest, 2007.
- [2] E. O. Andreeva, P. Aarabi, M. G. Philiastides, K. Mohajer, and M. Emami. Driver drowsiness detection using multimodal sensor fusion. *Proc. SPIE*, Vol. 5434, 2004.
- [3] Arne John Glenstrup and Theo Engell-Nielsen. Eye Controlled Media: Present and Future State. Master's thesis, University of Copenhagen, 1995.
- [4] D. Scott and J. M. Findley. Visual search, eye movements and display units. Technical report, University of Durham, South Road, Durham DH1 3LE, UK, 1993.
- [5] P. E. Hallett. *Handbook of Perception and Human Performance I*, chapter Eye movements, pp. 10.25-10.28. 1986.
- [6] S. Baluja and D. Pomerlau. Non-intrusive gaze tracking using artificial neural network. Technical report, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh PA, USA, 1993.
- [7] G. d'Ydewalle P. U. Muller, D. Cavegn and R. Groner. *Perception and Cognition*, chapter A comparison of a new limbus tracker, corneal reflection technique, purkinje eye tracking and electro-oculography, pp. 393-401. Elsevier Science Publishers, B.V, 1993.
- [8] Shebilske W. L. and D.F. Fisher. Understanding Extended Discourse Through the Eyes: How and Why. *Eye Movements and Psychological Functions: International Views* (pp. 303?314)., 1983.
- [9] R. H. S. Carpenter. *Movements of the Eyes*. London: Pion, 1977.
- [10] J. D. Cook D. A. Robinson D. S. Zee, L. M. Optican and W. K. Engel. Slow Saccades in Spinocerebellar Degeneration. *Archives of Neurology*, 33, 243?251., 1976.
- [11] P. V. C. Hough. Machine Analysis of Bubble Chamber Pictures. *Proc. Int. Conf. High Energy Accelerators and Instrumentation*, 1959.
- [12] R. O. Duda and P. E. Hart. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and curves in pictures. *Comm. ACM*, Vol. 15, pp. 11-15, January, 1972.

- [13] D. H. Ballard. Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes. *Pattern Recognition*, Vol. 13, No. 2, 1981.
- [14] H. K. Yuen, J. Princen, J. Illingworth, and J. Kittler. Comparative study of Hough transform methods for circle finding. *Image and Vision Computing*, Vol. 8, Issue 1, February, 1990.
- [15] Davies E. R. A modified Hough scheme for general circle location. *Pattern Recognition Letters*, Vol. 7, No. 1, 1988.
- [16] Illingworth J. and Kittler J. The adaptive Hough Transform. *IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence*, Vol 9, No. 7, 1987.
- [17] L. A. F. Fernandes and Oliveira M. M. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme. *Pattern Recognition*, Elsevier, Vol. 41, Issue 1, pp. 299-314, January, 2008.
- [18] P. Viola and M. Jones. Robust Real-time Object Detection. *Second International Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision-Modeling, Learning, Computing, and Sampling*, 2001.
- [19] Y. Freund and R. E. Schapire. A Decision-Theoretic Generalization of On-line Learning and an Application to Boosting, 1995.
- [20] B. D. Lucas and T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of Imaging Understanding Workshop*, pages 121–130, 1981.
- [21] J. L. Pfalz A. Rosenfeld. Sequential operations in digital picture processing. *Journal of the ACM* Vol. 13, No. 4, 1966.
- [22] K. Suzuki Lifeng He, Yuyan Chao. A run-based two-scan labeling algorithm. *IEEE Transactions on Image Processing* 17, 2008.
- [23] K. Suzuki, I. Horiba, and N. Sugie. Linear-time connected-component labeling based on sequential local operations. *Computer Vision and Image Understanding* 89, 2003.
- [24] Y. Han and R. A. Wagner. An efficient and fast parallel-connected component algorithm. *Journal of the ACM*, 1990.
- [25] Gary Bradski and Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 2008.

Függelék

F.1. Mellékletek

+++ forraskod, dokumentacio elerhetosegek +++

F.2. Telepítés

+++ forditas menete, szukseges szoftverek +++