



Dr. Molnár András

OPTIKA DÖLÉSMÉRÉSEN ALAPULÓ REPÜLÉSSTABILIZÁLÁS

BEVEZETÉS

Napjainkban, köszönhetően a rohamosan fejlődő informatikának és mikroelektronikának, egyre több kutatóhelyektől jelennek meg közlemények kis és közepes méretű robotrepülőgépek fejlesztéséről. Ezen repülő eszközök egy közös jellemzője, hogy rendelkeznek olyan szenzorral, vagy szenzorokkal, melyek segítségével meghatározható a repülőgép mindenkor térbeli orientációja. Az orientáció pontos meghatározását biztosító szenzorok eltérő elvek szerint működhetnek. A leggyakrabban alkalmazott szenzortípusok inerciális elven működnek. Ezeknek köznapi elnevezése a giroszkóp. Nagyobb gépek esetében a giroszkópok lehetnek mechanikus, úgynevezett pörgettyűs szenzorok, de manapság igen gyorsan terjednek a MEMS technológián alapuló elektronikus szenzorok is. Az inerciális elven működő szenzorok gyakori alkalmazásának oka, hogy a technológia kiforrot, az elvek jól ismertek, az alkalmazás során fellépő hibák előre ismertek és kompenzációikra gyakorlati tapasztalatokon alapuló eljárások léteznek. Mindezek ellenére a mechanikus eszközök túl nagyméretűek a sokszor mindössze néhány kg felszálló tömegű robotrepülőgépek számára, illetve a MEMS technológiákon alapuló giroszkópok igen drágák, miközben stabilitásuk jóval elmarad a mechanikus szenzorokétól.

Több, főleg magán kezdeményezésű kutatócsoport próbál meg alternatív orientáció mérő eszközt kifejleszteni repülőgépeik számára. Az alternatív módszerek egyike a horizont mérése alapján történő dőlésmérés. Az értekezés ismerteti néhány más elven működő dőlésmérő eszközt azok előnyit és hátrányait is érintve, valamint ismerteti egy lehetséges optikai elven működő rendszert. A rendszer ismertetése túlmutat az elvi megoldásokon. Részletesen kerül ismertetésre az optikai horizont gépi meghatározásának egy MATLAB szimulációja, valamint egy Visual Stúdió fejlesztői környezetben történt megvalósítása.

MEMS TECHNOLOGIÁN ALAPULÓ, KERESKEDELEMBEN KAPHATÓ GIROSKÓPOK

Microstrain szenzorok [1]

A Microstrain egy 1987-ben alapított mikroelektronikai cég, székhelye az USA-ban van. A cég fő profilja a szenzorgyártás, és fejlesztés, ezen belül is a lineáris elmozdulást mérő, és dőlésmérő szenzorok. Szenzorjaikat főleg az autóiiparban, bio-mechanikai rendszerekben, és a hadiiparban alkalmazzák. A hadsereg nagyrészt pilóta nélküli repülőgéprendszerekben használja a cég által gyártott dőlésmérő

eszközöket. Az általuk gyártott dőlésmérő szenzorok több funkciót is ellátnak. Természetesen képesek dőlésmérésre, de ezen felül lineáris gyorsulás mérésére, szöggyorsulás, és hőmérséklet megállapítására is alkalmasak. Egyes típusok pedig még mágneses tér érzékelővel is fel vannak szerelve. A szenzorok mikroelektromechanikai (MEMS) eszközökből, és fejlett mikrokontrollerekből épülnek fel.

A szenzorok igen pontos giroszkópokkal vannak felszerelve, amelyek segítségével az egyes tengelyeken való elfordulás mérése fél fokos pontosságot is elér, a felbontás pedig egy tized foknál is kisebb.

A szenzorok hőmérsékletbeli működéstartománya pedig akár -40 -tól $+85^{\circ}\text{C}$ -ig terjedhet. Egyes szenzorok pedig teljes hőmérsékletkompenzációval is rendelkeznek a működési tartományban.

A mért eredmények digitális, és analóg formában is hozzáférhetőek. Digitálisan USB 2.0, soros portokon vagy vezeték nélküli hozzáféréssel létesíthető kapcsolat.

A vezeték nélküli hozzáféréshez a cég többfajta eszközt is gyárt, amelyekkel a szenzorok által küldött adat belső memóriában tárolható, továbbküldhető más feldolgozóegységek felé.

A robotrepülőgépeken alkalmazott típusok egyik nagy előnye, hogy bekapcsolás után nem igényelnek kalibrációt. Ezt a műveletet a szenzorba integrált mikrokontroller, illetve annak programja az egységbe épített kilenc különböző szenzor adatainak fúziója alapján képes elvégezni. Az előbbiekből következik, hogy a giroszkóp működés közben is képes saját adatainak korrekciójára, bár ez a szolgáltatás esetenként zavaró is lehet. Talán éppen ezért a giroszkóp minden adata hozzáférhető, így a felhasználó döntésén múlik, hogy a „nyers” adatokkal, vagy az eszköz beépített algoritmusai által szűrt és korrigált adatokkal kíván-e dolgozni.

Xsens szenzorok [2]

A Xsens a Microstrain szenzorjaihoz hasonló megoldásokat kínáló holland cég. A helyzetérzékelő szenzoroknak olyan változatát is gyártják, amiket emberi mozgások monitorozására fejlesztettek ki. Ezekkel a szenzorokkal animációkhoz, számítógépes játékokhoz készíthetőek életszerű mozgások, az emberi mozgások rögzítésével. Egyéb lehetséges alkalmazási területe például katonák kiképzése, amikor az ember által végzett mozgások alapján egy virtuális képet vetítenek a katonák szeme elé, amin a környezetük a mozgásuk hatására változik. Ez az alkalmazás persze igencsak jövőbetekintő, és még csak kezdeti fázisban jár.



1. ábra Xsens MTI-G szenzor

A szenzorok másik csoportja ugyanúgy pilóta nélküli repülőgépeken, tengeralattjárókon és mobil robotokon használatos.

Az Xsens szenzorjai ugyanúgy giroszkópokkal felszereltek, képesek a szöggyorsulás mérésére, és a föld mágneses mezejének mérésére magnetométerekkel. A működési paramétereik is hasonlóak a Microstrain szenzorokhoz.

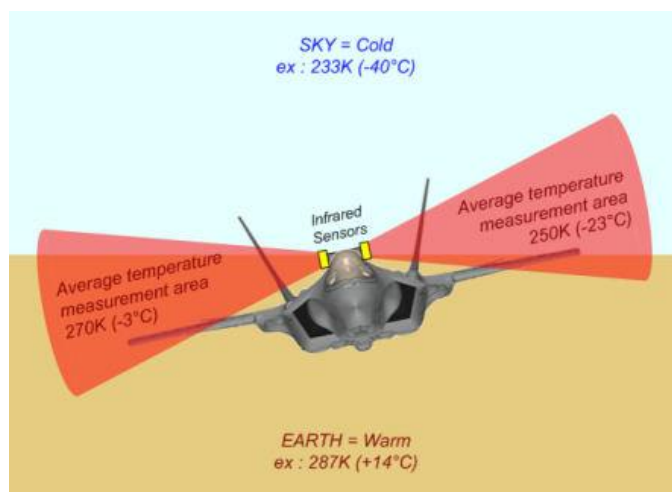
Újdonságként a MTI-G szenzor képességei közül a beépített nagy pontosságú GPS vevőt lehet megemlíteni. Ez akkor lehet fontos, ha az irányított repülő vagy egyéb ember nélküli szerkezet navigációja GPS koordináták által vezérelt.

Repülők esetében egy ilyen szenzor alkalmazásával könnyen végigrepülhető egy útvonal, ami előzőleg egy GPS alapú rendszeren lett meghatározva. Nem szükséges a földrajzi koordináták átkonvertálása méter adatokra, hiszen mindig rendelkezésre áll az irányított rendszer aktuális földrajzi helyzete.

Hőmérsékletkülönbségen alapuló repülésstabilizáló

FMA Co-Pilot Flight Stabilization System [3] [4]

Az FMA Co-pilot rendszereket távirányítású modellek (repülő, helikopter) repülésstabilizálásra fejlesztették ki. Ez hasznos segítség lehet kezdők számára, akik most tanulják a gépek kezelését, vagy tapasztaltabbaknak is, ha új modellre váltanak, megelőzendő a gépek összetörését. Viszonylagosan alacsony ára és a meglévő távirányító rendszerekhez kialakított illesztése kedvelt eszközzé teszi amatőr robotrepülőgépek stabilizálására.



2. ábra Az IR érzékelés alapja

Az FMA rendszer működése a következő:

A Co-pilot szenzor egysége, amely a repülő, vagy helikopter vázára vízszintesen felfekszik, infravörös szenzorokkal a horizontot figyeli, az alaprendszer szenzoregysége 4 darab érzékelőt tartalmaz, ezzel X és Y tengelyek mentén történő dőlés határozható meg.

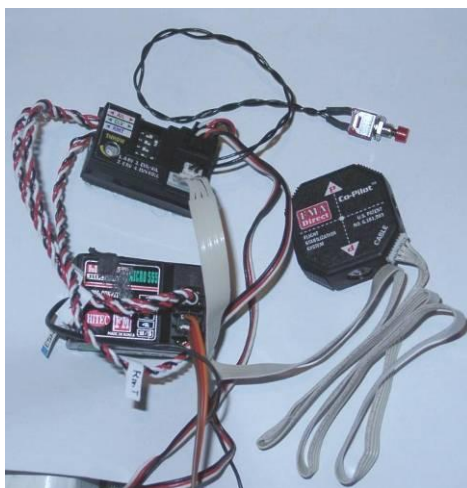
Az egymással szemben elhelyezkedő infravörös szenzorpárok érzékelik a föld, és az égbolt hőmérsékletkülönbségét, amely vízszintes repülés esetén zérus, kilencven fokok eltérés esetén pedig a legnagyobb.



3. ábra Az FMA rendszer IR szenzora

A vezérlőegység a hőmérséklet különbségekből megállapítja az eszköz helyzetét, majd megfelelő korrekciós jeleket küld az irányító szervóknak, hogy a gép dőlését kompenzálja. Lényegében a szenzorpárok kimenetei egy komparátorra vannak kötve, melynek kimenete arányos a bejövő jelek eltéréssel. Mivel az infravörös hatások nem függenek a látható fénytől, ezért a rendszer éjszaka is megbízhatóan működik. Csak nagy időjárásbeli változások okoznak jelentős eltéréseket az infravörös spektrumban. Az erős köd, a felhők közötti repülés, vagy hó a földön, esetleg túl közeli fák megzavarhatják a rendszert.

Minden repülés megkezdése előtt ajánlott a rendszert kalibrálni az éppen aktuális hőmérsékleti viszonyokra. A kalibráció időjárás-változás miatt is szükséges lehet.



4. ábra Az összekábelezett FMA CPD4

A rendszer akár repülés közben is ki-be kapcsolható és hangolható, ha van egy szabad csatorna az adó-vevő egységben. A pontosan felszerelt rendszer 2 fokok pontossággal képes beállítani a repülő dőlését.

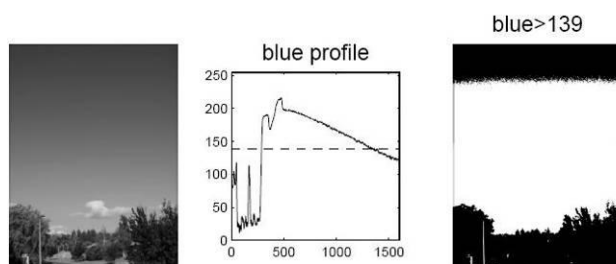
Az FMA Co-pilot rendszernek 2 változata létezik. A régebbi CPD4 nevű rendszer, a fent leírt alapszolgáltatásokat biztosítja, és csak analóg szervókhoz használható.

Az újabb FS8CP nevű lényegesen több szolgáltatást nyújt. Egy vertikális helyzetű úgynevezett Z szenzorral egészítették ki a szenzorrendszert, mely segítségével a rendszer meg tudja állapítani, hogy merre van ég, és a föld, ezáltal a háton repülő gépet is képes megfordítani. A Z szenzor még a kalibrációnál is segít, nem kell a gépeket vízszintesen tartani a kalibrációhoz, ez főleg nagy gépek esetén lehet fontos.

Mindkét rendszer megvásárolható a gyártó honlapján.

Dőlésszög meghatározás horizont detektálással

A feldolgozás alapja, hogy a digitális képen egy szegmentációval el kell különíteni az égboltot, és a földet. Az egyik lehetséges megoldás, hogy a kép kék csatornáján alkalmazunk küszöbölést megfelelően megválasztott paraméterrel. Tiszta égbolt esetén a kék csatorna értékei jelentősen magasabbak az égbolt esetén, a földihez képest. Felhős ég esetén a különbség kisebb, de még mindig elkülöníthető a két képrész.



5. ábra Szegmentálás a kék csatornán

Ha a kék csatorna nem megfelelő erre a célra, - például egy havas terület, vagy víz fölött készült a kép - akkor használható a textúra alapú elkülönítés is. Az égbolt textúrája általában jelentősen eltér a földi textúráktól. A felhők hatásának kiküszöbölésére alkalmazható a szegmentálásnak egy olyan módja, amikor az egyes csatornákon egyenként kell élkeresést végezni, majd újra össze kell állítani a képet. A szegmentált képen, closing és opening eljárásokkal a kisebb zavarok eltüntethetők. Ezután egy Hough-transzformációval megkereshető a horizontot reprezentáló egyenes.

LEHETSÉGES MEGVALÓSÍTÁS

A videójelet szolgáltató alrendszer feladata a megfelelő mennyiségű képi információ továbbítása oly módon, hogy a repülő eszköz teljes környezete megfigyelhető legyen. Ahhoz hogy a gép helyzete meghatározható legyen, kamerákkal a tér minél nagyobb részét kell belátni. Mivel egy átlagos kamera látószöge körülbelül 50 fok, könnyen belátható, hogy a teljes teret nem képes egy kamera lefedni. Emiatt vagy a kamerák számát kell növelni, vagy pedig speciális optika alkalmazása szükséges. Lehetséges megoldás, hogy több kamerát helyezünk egy síkba, melyek egymással azonos szöget zárnak be. Ez már elegendő látószöget biztosíthat a

helyzet-meghatározáshoz. Léteznek extra nagy látószögű kamerák is, melyeknek a látószöge akár a 90 fokot is elérheti. Ezek alkalmazásával a kamerák száma minimalizálható úgy, hogy a teljes körpanoráma észlelhető. Másik lehetséges megoldás, ha egy kamerából áll a rendszer, és egy speciális úgynevezett halszemoptikát tartalmaz, mellyel a teljes környezet megfigyelhető. Ez esetben a kamera ugyan a teljes környezetről szolgáltat információt, de az általa rögzített kép nagyon torzul a hatalmas látószög miatt. Ez a későbbi feldolgozást nagymértékben megnehezítheti.



6. ábra Halszemoptikával készült teljes panorámakép [5]

Egy ilyen torzult képen nehéz a horizont dőlésének meghatározása további korrekciókat igényel. Igaz ugyan, hogy ezek a korrekciók az optika ismeretében meghatározhatóak és konstansnak tekinthetők, mégis jelentős számítási igénnyel bírnak.

Több lehetséges alternatíva közül a négy kamerából álló kamerarendszer alkalmazása kedvező választásnak tekinthető. Ez a rendszer később, megfelelően nagy kamera alkalmazása esetén egyetlen kamerára és egy viszonylag egyszerű, síktükrökből felépített optikára redukálható. Az eredmény ebben az esetben egyetlen kép (video) melyen a négy irányban látható táj a kép egy-egy negyedén jelenik meg. A kísérleti rendszer kameráinak elvi felépítése az alábbi képen látható.



7. ábra Négy kamerából álló képrögzítő rendszer

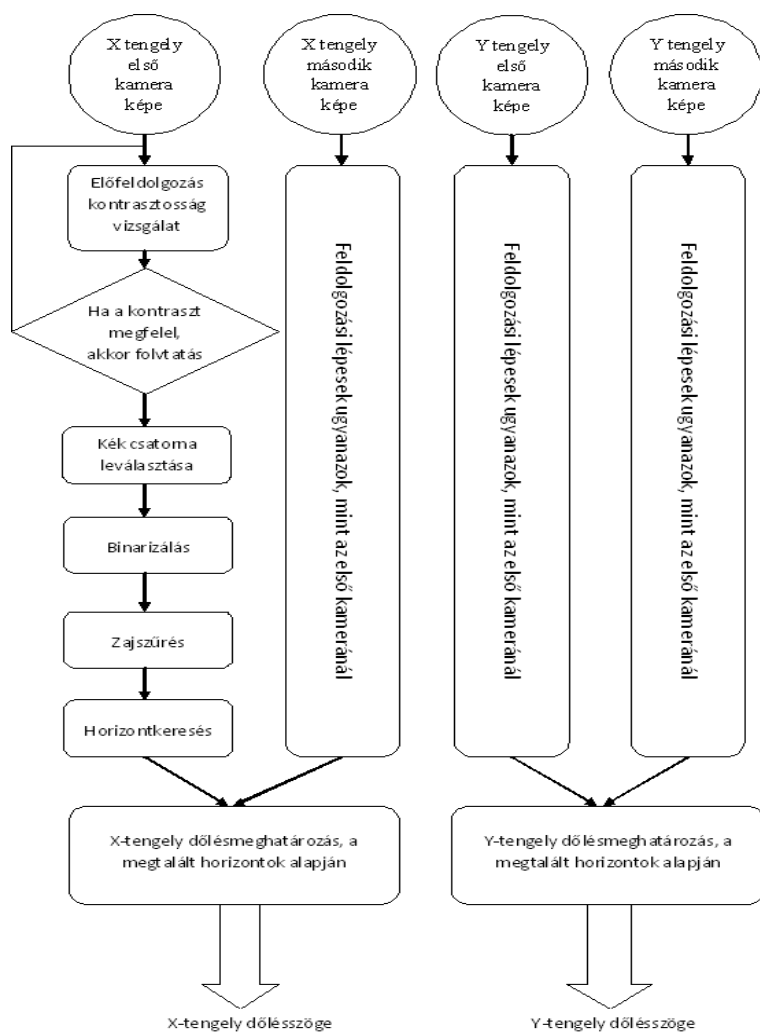
Ezzel a módszerrel elegendő információt nyerhető a helyzet-meghatározáshoz, és a megvalósítása is viszonylag egyszerű. Az hogy a kamerák egymással 90 fokot zárnak be azért fontos tulajdonság,

mert az egymással háttal álló kamerapárok egy-egy tengely menti horizontdőlés érzékelésére képesek. A kamerák közül az egyik a repülő orra felé, a neki háttal lévő a repülőgép farka felé, a másik kettő pedig a két szárny irányába kell, hogy nézzen.

Ezen elrendezés használatával a szárnyak irányába néző kamerák érzékelik a repülő emelkedési és dőlési szögét. A gép hossz tengelyén elhelyezkedők pedig a jobbra illetve balra dőlését érzékelik az első és hátsó horizonton történő dőlési-szögváltozás alapján.

A videó feldolgozás menete

A kamerák által szolgáltatott videók egy időben, képkockánként kerülnek feldolgozásra. A feldolgozási lépéseknél csak egy kamera képének feldolgozása kerül ismertetésre, mivel ez kameránként megegyezik. Amikor a végső eredmény kerül meghatározásra akkor természetesen mind a négy kép szerepet kap. A helyzet meghatározás arra épül, hogy a képeken a feldolgozó algoritmus megkeresi a horizontot legjobban reprezentáló egyenest, majd ha ennek a dőlési értékét mind a négy kamera képén kiszámította, akkor meghatározza teljes rendszer dőlését.



8. ábra A képfeldolgozás lépései

Előfeldolgozás

Amikor egy kép feldolgozását elkezdi a rendszer, az első lépés annak meghatározása, hogy egyáltalán érdemes-e a képpel foglalkozni. Számos olyan eset lehet, amikor a képen a horizont vonala nem határozható meg, vagy nagy valószínűséggel hamis eredményre vezetne a feldolgozás. Ilyen eset például, amikor a képen nem látszik a horizont, tehát vagy csak a földet, vagy az eget látja a kamera, esetleg a nap belesüt az optikába. De akár köd, vagy erős esőzés is okozhat ilyen problémát.

A kép relevanciájának meghatározására annak kontrasztosság vizsgálata a legegyszerűbb megoldás. Ez úgy történik, hogy meg kell határozni a kép hisztogramja alapján a képkocka Otsu-küszöbét[6], és ha túl alacsony, vagy túl magas, akkor annak kontrasztja nem megfelelő. Léteznek ugyan ennél bonyolultabb eljárások, de azok eredményessége és számításigénye nincs kellő arányban. Az eljárás alapja az a gyakorlati tapasztalat, hogy ha kép túl sötét, vagy túl világos, igen valószínű, hogy a feldolgozó algoritmus valótlan horizont-vonalat találna.

Ha a kép az előfeldolgozás során megfelelőnek bizonyul, akkor a rendszer folytatja a horizont keresését, ha nem, akkor az adott képet nem használja, hanem az előző képkocka által adott horizontot veszi alapul a helyzet-meghatározáskor. Természetesen attól, hogy az egyik kamera által küldött kép nem megfelelő a maradék három kamera még szolgáltathat helyes horizontot

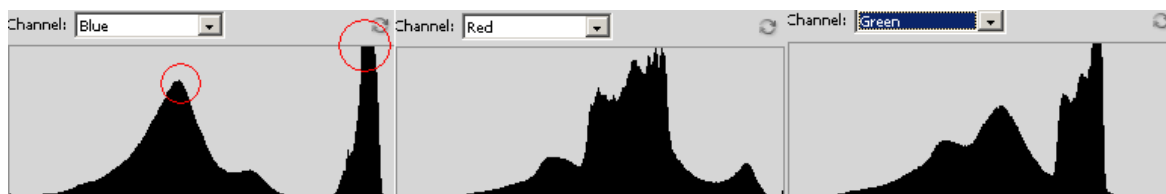
Kék színcsatorna leválasztása

Ha a képet a kontrasztosság vizsgálat megfelelőnek találta, akkor elkezdődhet a horizont keresése a képen. Ebben a folyamatban az első lépés a kép kék csatornájának leválasztása. Ezen a csatornán a térnek el legjobban az ég, és a föld intenzitásértékei egymástól. Az ég csak kék komponenst tartalmaz, míg a föld változatosabb színeket vehet fel, de a zöld a domináns.



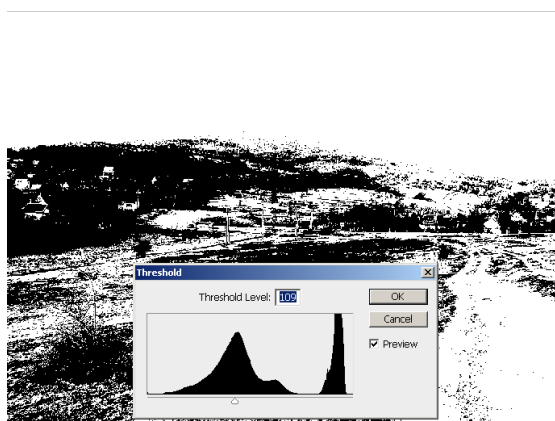
9. ábra Az égbolt és táj viszonya a kék csatornán

Például a következő képen jól megfigyelhető, hogy az egyes csatornák hisztogramjai közül, a kék csatornánál látszik a legjobban a két kiemelkedő csúcs, amik az eget, és földet reprezentálják.

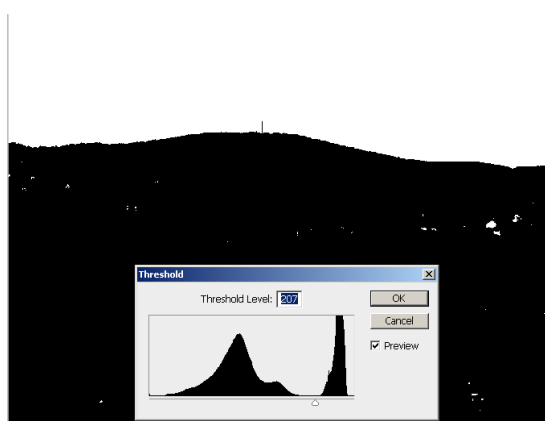


10. ábra A kép RGB csatornáinak hisztogramja, a kék csatornán jelölve a két csúcs

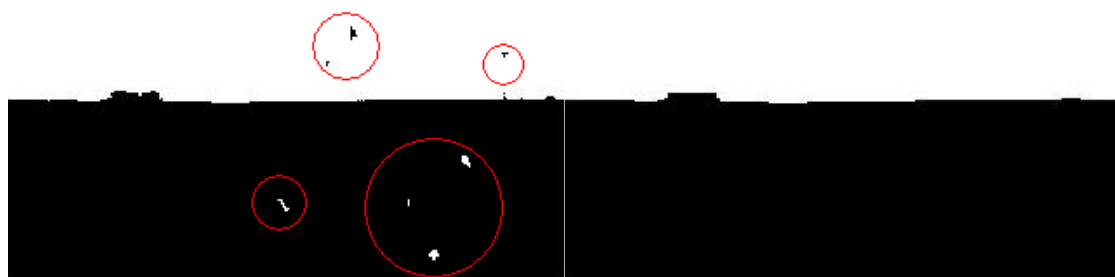
Tehát a kék csatorna alkalmazásával különíthető el legjobban két térrészlet, ha az eget és a földet akarjuk egymástól elválasztani.



11.a. ábra 109-es küszöbszint



11.b. ábra 207-es küszöbszint



12.a. ábra Zajok a képen

12.b. ábra Zajsűrés utáni állapot

Horizontkeresés

Az utolsó lépés a feldolgozás során, hogy meg kell állapítani a horizont helyzetét. Erre két különböző módszert is kidolgozásra került.

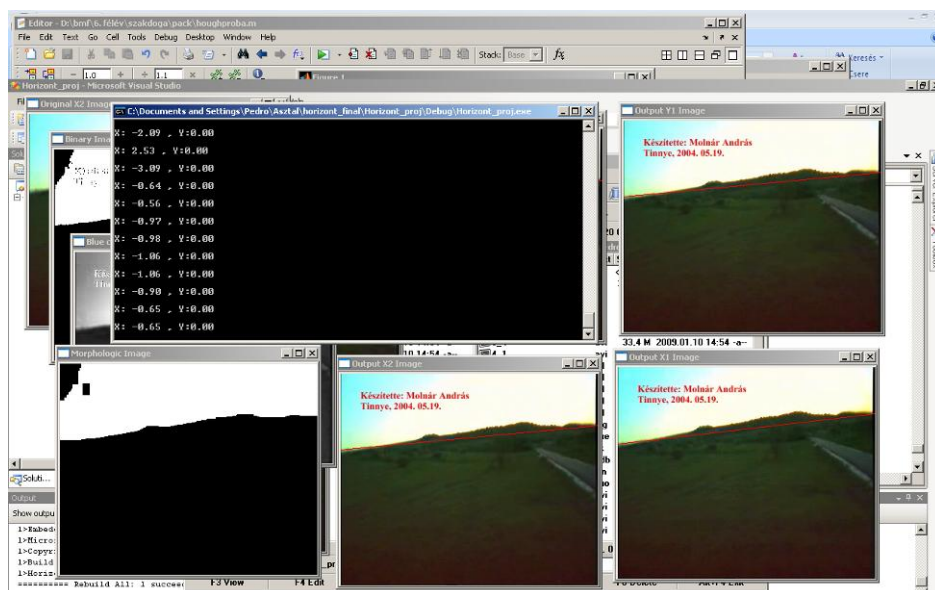
Az első lehetséges módszer a horizont detektálására a Hough-transzformáció[7]. Ennek a módszernek az az előnye, hogy adott dőlésű egyenesek kereshetők vele. Olyan egyenesek megkeresésére is használható melyek csak részletekben állnak rendelkezésre. Az hogy milyen finom felbontással keressük az egyeneseket az is csak előre beállított paramétereken múlik. A módszer rövid

működése a következő. Létre kell hozni egy akkumulátor mátrixot, amelynek egyik dimenziója egy r érték a másik α szög. α értékei 0-tól 180-ig változnak, r értéke pedig 0-tól a kép átlójának hosszáig. Az egyeneseket a Hesse féle normálalakos leírással reprezentáljuk ($r = x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha)$) ahol r az origótól vett távolság α pedig a vízszintessel bezárt szög. Ezután a kép pontjain végighaladva, minden olyan pontnál meg kell növelni az akkumulátor tömb értékét, ahol az r és α párok által reprezentált egyenesen a pont rajta lehet. Ha az összes képpontra megtörtént a számítás, akkor a mátrixban a lokális maximumok jelzik az egyeneseket.

A Hough-transzformáció mellett egy másik módszerrel is megkereshető a horizont. Ha a kép megfelelően szegmentált, és a képen elhelyezkedő horizont közel egyenes, akkor a horizont úgy is megtalálható, hogy sorba vesszük a kép egyik szélső oszlopának pixeleit, és ahol a fekete-fehér váltást megtalálható, az a pont lesz a horizont egyik vége. A horizont másik végét hasonlóan lehet meghatározni a másik oldalon keresve a fekete-fehér átmenetet. Ha megvan a két pont, akkor őket összekötve megvan a horizontot legjobban megközelítő szakasz is. Könnyen belátható, hogy ez a módszerhez kevesebb számítást igényel, mint Hough-transzformáció. Legrosszabb esetben is csak (képmagasság+képszélesség)*2 összehasonlítást kell elvégezni a horizont megtalálásához. A keresés gyorsítható, ha feltételezzük a horizont megszokott helyzetét. Tehát ha az esetek nagy százalékában a horizont vízszintesen helyezkedik el, akkor a képnek a bal és a jobb oldalán kell kezdeni a végpontok keresését, és csak akkor kell a felső és alsó oldalt vizsgálni, ha a jobb és bal nem hozott eredményt.

Dőlésmeghatározás

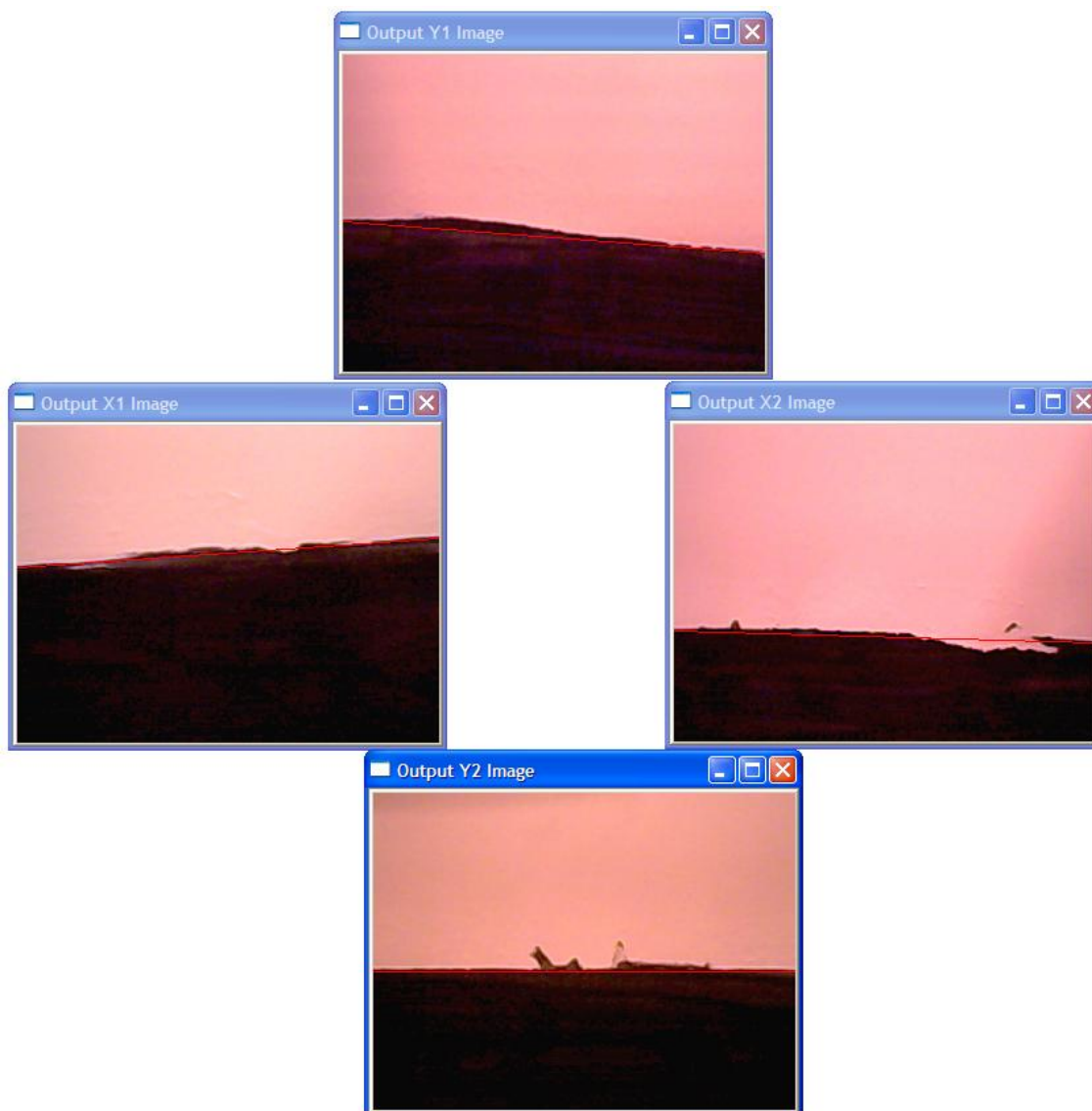
Ha a négy kamera által szolgáltatott képek mindegyikére el lettek végezve az előző eljárások, akkor előállnak a képeken található horizontok kezdő és végpontjai. Ebből egy rövid számítással meghatározható a horizontok dőlése a vízszinteshez képest. Mivel a négy kamera kilencven fokként helyezkedik el, ezért az egyik kamerapáros a térbeli X a másik az Y tengely menti dőlési értéket határozza meg.



13. ábra A tesztprogram működése egy légi felvételen

Tehát rendelkezésre áll kettő dőlési érték tengelyenként, amik az egymásnak háttal álló kamerák képe alapján keletkezett. Ennek a két értéknek abszolút értékben meg kell egyeznie, hiszen egy tengely mentén a dőlés is ugyanakkora. Azért abszolút értékben egyeznek meg, mert ha az egyik képen a horizont balra dől, akkor a párján, ami a neki háttal lévő kamerával készült a dőlés jobbra jelentkezik. Persze a horizont magasságát a képen befolyásolhatja a másik tengely mentén lévő dőlés, de a dőlési szöget semmiképp sem.

A dőlési szögben keletkező eltérést csak a feldolgozás pontatlansága és a táj változatossága befolyásolhatja. Tényleges dőlésnek elfogadható a két dőlési érték abszolút értékének átlaga. Ha a két kép közül az egyik az kontrasztvizsgálat során nem bizonyul alkalmasnak, akkor a másik képen kapott dőlési érték lesz az eredő. Ha a tengelyen elhelyezett egyik kamera sem ad elfogadható képet, akkor a legutóbbi feldolgozás eredménye lesz a kimenet.



14. ábra A négykamerás rendszer tesztje

Tapasztalatok, fejlesztési tervek

Az algoritmusok tesztelése során kisméretű robotrepülőgépek által készített videókon is sikerrel lehetett a horizont detektálását és annak dőlését realizálni. A detektálás biztonsága erősen függ azonban a kép minőségétől. Jelentős zavaró hatások közül főleg a nap intenzív fényét, valamint a földdel egybeolvadó, sötét felhőket kell megemlíteni.

A kutatás következő fázisában egy fedélzeti egység megvalósítása a cél. Ez mind kamerarendszer, mind képfeldolgozási eljárások optimalizálása, mind számítógépes platform tekintetében jelentős fejlesztéseket igényel.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] <http://www.microstrain.com/> , (2008.01.12)
- [2] <http://www.xsens.com/en/home.php>, (2008.01.12)
- [3] <http://plawner.net/> <http://www.fmadirect.com/> , (2008.04.02)
- [4] Haiyang Chao; Yongcan Cao; YangQuan Chen: Autopilots for Small Fixed-Wing Unmanned Air Vehicles: A Survey, Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. International Conference on Volume , Issue , 5-8 Aug. 2007
- [5] http://www.flickr.com/photos/martin_heigan/1518652806/, (2008.12.20) Martin Heigan, Creative Commons licenz alatt
- [6] N. OTSU (1979): A THRESHOLD SELECTION METHOD FROM GRAY-LEVEL HISTOGRAMS, IEEE TRANS. SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS. 9, P. 62–66
- [7] VALAKI Jozsef: Cím, Budapest,