

# SZTEREO ALGORITMUS LÉGKÖRI FELHŐK REKONSTRUKCIÓJÁHOZ

## STEREO ALGORITHM FOR ATMOSPHERIC CLOUD RECONSTRUCTION

Kátai-Urbán Gábor<sup>1\*</sup>, Vilem Otte<sup>2</sup>, Megyesi Zoltán<sup>1</sup>, Paul S. Bixel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Informatika Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Pallasz Athéné Egyetem, Kecskemét,  
Magyarország

<sup>2</sup> TMEIC Corporation, Roanoke, USA

---

### **Kulcsszavak:**

Halszemoptika  
Sztereo rekonstrukció  
Szférikus kameramodell  
Sűrű illesztés

### **Keywords:**

Fish-Eye Camera  
Stereo Reconstruction  
Spherical Camera Model  
Dense Matching

### **Cikktörténet:**

Beérkezett 2016. október 4.  
Átdolgozva 2016. november 14.  
Elfogadva 2016. november 20.

---

---

### **Összefoglalás**

*Ebben a cikkben bemutatunk egy légköri felhők felületét rekonstruáló eljárást, ami sztereó kamerarendszer képeit használja fel. Bemutatásra kerül az egész folyamat a javasolt kamerarendszertől a 3D ponthalmaz előállításáig, de a fő hangsúly a felhőszegmentáláson és a sztereó rekonstrukció képfeldolgozási lépésein lesz.*

### **Abstract**

*This article presents a method for reconstructing atmospheric cloud surfaces using a stereo camera system. The whole pipeline from the proposed camera system to the creation of the 3D point set is discussed, but the focus is mainly on cloud segmentation and on the image processing steps of stereo reconstruction.*

---

## **1. Bevezetés**

### **1.1. Motiváció**

A szabad égen látható objektumok rekonstruálása vonzó témakör mind a praktikus alkalmazásokban (légi navigáció vagy detekció), mind az alkalmazott tudományokban (meteorológia, asztronómia, vagy fotogrammetria). A mérést végző hardver eszközök, amelyek az adatot szolgáltatják ezekhez az alkalmazásokhoz, széles spektrumban változhatnak a lézer szkennerektől az aktívfény szkennerekig. Mindemellett a viszonylag egyszerű felépítésű passzív kamerarendszerek használatának is van számos előnye a kihívások mellett.

Az utóbbi három évtizedben számos különböző égből készítő eszközt fejlesztettek. Az 1980-as években a fő cél az volt, hogy detektálható legyen az égből felhőssége. Az első digitális teljes égből készítő berendezést 1984-ben fejlesztették ki [4]. Ez az eszköz kék és vörös hullámhosszakban készített digitális képeket CID (Charge Injection Device) szenzor felhasználásával. Ezen adatok feldolgozására lett kifejlesztve az első automatikus felhő detektáló algoritmus, ami minden egyes pixelt felhő, vékony felhő, vagy tiszta ég kategóriába volt képes sorolni. A nappali érzékelők után az 1990-es években indult el az éjjel-nappal működni képes felhőzet detektáló szenzorok fejlesztése. A legtöbb eszköz halszemoptikát használt 180°-os látószöggel. A detektorok idővel változtak: a CID-től a szürkeárnyalatos CCD-n keresztül az RGB CCD szenzorokig [12].

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 76 514300  
E-mail cím: katai-urban.gabor@gamf.kefo.hu

## 1.2. Felhődetektálás története

Égképeken kihívást jelent a felhők detekciója. Az általános felhő nem írható le alakja, kontúrja, vagy struktúrája alapján. A szín a legtöbb információt hordozó tulajdonság, amit a felhők szegmentációjához fel tudunk használni.

Több különböző szín alapú szegmentációs eljárást találhatunk a szakirodalomban. A fő különbség köztük, hogy milyen színmodellt alkalmaznak. Az első eszközök speciális kamerákat alkalmaztak, amelyek a megfelelő hullámhosszakon tudták a fényt detektálni [4]. Ezek a hullámhosszak a kék és vörös színhez voltak közel. Miután a CCD szenzorok elterjedtek a sztenderd RGB szintért használták. A vörös és kék csatornák arányát (R/B), vagy különbségét (R-B) elemezték a 2000-es évek elején [7][1]. 2014-ben egy részletes elemzést publikáltak [2], amelynek a célja az volt, hogy meghatározza melyik színcsatornák a legjobban használhatóak a felhők szegmentálására. Ez a tanulmány más színmodelleket is elemzett: HSV, YIQ, CIE. Az eredmények kimutatták, hogy a HSV színmodell S csatornája a legígéretesebb csatorna a felhők szegmentálására. Az általunk javasolt szín tulajdonság részleteit a felhő szegmentáció fejezetben tárgyaljuk.

## 1.3. Sztereo rekonstrukció

Kültéri színterek sztereo, vagy többkamerás rekonstrukciója részletesen kutatott területe volt az elmúlt évtizedekben. Ezek a fejlesztések kombinálva a fejlett kamera optikákkal, szenzorokkal és a folyamatosan növekvő számítási teljesítménnyel hozzájárultak számos gyakorlati alkalmazás megvalósításához. Sok alkalmazás célozza a felület rekonstrukciót [10], gyakran széles bázistávolsággal készült képek alapján is [8]. A szférikus sztereo rendszerek használata is bemutatásra került [5], amelyek halszemoptikát alkalmaznak. Viszont hasonló passzív sztereo kamerarendszert használó felhő felületét rekonstruáló alkalmazás még nem került a fókuszba.

## 2. A kamerarendszer

Ahhoz, hogy felvételeket tudjunk készíteni a teljes égbolton lévő felhőkről egy speciális képalkotó rendszer szükséges. A leghatékonyabb megoldás, ha nagy látószögű (Field of View, FOV) kamerákat alkalmazunk, amelyek képesek vízszintesen  $360^\circ$ -ban és függőlegesen  $180^\circ$ -ban megfigyelni az eget.

### 2.1. A geometria

A kamerarendszert rekonstrukcióra szeretnénk használni, ezért szükséges ismernünk egy modellt, ami leírja azt a vetítést, ahogyan a kamera világának pontjait a képre leképezzük. A lyukkamera modell a legegyszerűbb és leggyakrabban alkalmazott modell a képfeldolgozás területén. Ebben a modellben adott egy kamera középpont és egy képsík (lásd: 1-a. ábra). A színtér pontjait az origón átmenő egy-egy egyenessel vetíthetjük le a képsíkra. Mivel ez a modell feltételezi, hogy a színtér pontjai a képsík előtt helyezkednek el, nem képes a széles látószög miatt felmerülő esetek kezelésére. Ha a látószög  $180^\circ$ -nál szélesebb, akkor a színtér pontjai az egyenes mindkét felén lehetnek, így a lyukkamera modellt nem lehet alkalmazni.

Ezzel szemben a szférikus vetítési modell [6] (lásd: 1-b. ábra), amely egy egységgömb felszínére képezi le képpontokat, képes a  $180^\circ$ -nál nagyobb látószöget is modellezni. A színtér  $X_s$  pontját a gömbfelszín P pontjára vetíti le, úgy hogy a vetítő vektort normalizálja, ami az  $O_s$  vetítési középpontból mutat a színtér pontjába. A  $P = \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \end{bmatrix}$  egység vektor a következő összefüggéssel vetíthető le a  $p$  képpontra:

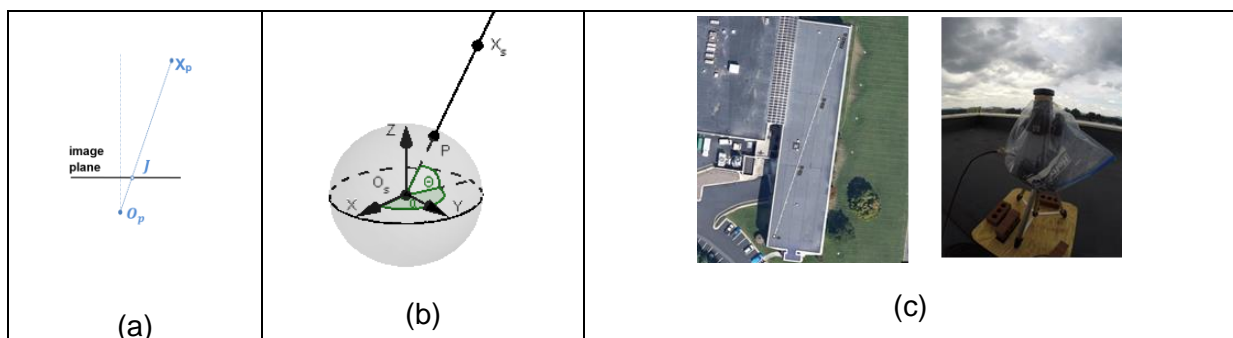
$$p = \begin{bmatrix} r \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

, ahol  $r$  a képen az optikai középpont távolsága és  $f(\theta)$  a fókusztávolság a  $\theta$  függvényében megadva. A projektív geometriának [3] megfelelően egy kamera csak a rekonstruálandó objektumról érkező fénysugár azonosítására alkalmas. Ahhoz, hogy az objektum 3D pontjait rekonstruálni lehessen, több kamerára van szükség. Az objektumok pozíciója triangulációval állapítható meg [13].

## 2.2. A javasolt kamera elrendezés

A kamerák közötti távolság (bázistávolság) a kamerarendszer tervezése során határozható meg. A bázistávolságnak hatása van a trianguláció pontosságra és a légköri felhők megfeleltetésre is. A maximális triangulációs pontosság akkor érhető el, ha a vetítési vektorok közel merőlegesek egymásra. Ha feltételezzük, hogy a felhők 1000-5000 m magasságban vannak, akkor a bázistávolságot 2000-10000 m-nek kellene választanunk. Viszont ez a széles bázistávolság nagy geometriai torzulást okoz a kameraképek között és így lehetetlenné teszi a felhők megfeleltetését. Ahhoz, hogy egy a gyakorlatban is működő beállítást javasoljunk a fenti mindkét feltételnek meg kell felelnünk.

Két Canon T3i kamerát alkalmaztunk, amelyek Sunex SuperFisheye™ lencsékkel készítették a képeket. A kamerák egy három emeletes irodaépület tetején kerültek elhelyezésre, ami biztosította a kitarításmentes felvételek készítését (lásd: 1-c ábra). A bázistávolságot 90 m-ben határoztuk meg, ami jó kompromisszumnak bizonyult a pontosság és az illeszthetőség szempontjából is. A képek egyidőben történő rögzítése elengedhetetlen a mozgó objektumok miatt, ezért a kamerák egy közös szinkronjel határára exponáltattuk. A kamerarendszer 15 másodpercenként készített képeket.



1. ábra. (a) Lyukkamera modell, (b) Szferikus kameramodell, (c) Az installált kamerarendszer

## 3. 3D rekonstrukció

A 3D rekonstrukció célja, hogy meghatározza olyan térbeli pontok 3D koordinátáit, amelyek több képen is láthatóak. Ehhez egy megfelelő illesztési eljárással egymásnak megfelelő pontpárokat kell azonosítanunk a jobb és baloldali nézeteken. A 3D pont meghatározása triangulációval történik a pontpárok alapján [3] [13].

### 3.1. Sűrűillesztés

A sűrűillesztés célja, hogy minél több 3D pontvetületet azonosítson a képeken. A probléma az, hogy sok térbeli pont takarásban van, valamilyen torzuláson esett át, vagy homogén környezetben helyezkedik el. Ennek ellenére eléggé sűrű pontfelhőt kell előállítanunk, hogy a felületek rekonstruálhatók legyenek. Több eljárást publikáltak már, amelyek képesek ezekkel a problémákkal megküzdeni [8][9]. A sűrűillesztés számításigényes feladat, de a legtöbb eljárás iteratíván megközelítést alkalmaz (például: piramis alapú feldolgozás), ami a ritka illesztésből származó előzetes információkat használ, vagy tulajdonságon alapuló szegmentálást alkalmaz a rekonstruálandó pontok számának csökkentésére.

### 3.2. Sűrűillesztés felhőpixeleken

Az általános sűrű illesztési feladathoz képest a felhőpixelek illesztésénél más speciális szempontokat is figyelembe kell venni. Ahhoz, hogy megtaláljuk a megfelelő megoldást, elemeznünk kell az objektumok láthatóságát, textúráját és az előforduló torzító hatásokat (2. ábra).

Geometriai torzulás: Ez a hibatípus gyakran előfordul széles bázistávolságú kameraképek esetén a nagy nézőpontváltás miatt. Általánosságban, egy síkfelület torzulását, amely perspektív torzuláson ment át, lokálisan egy affin transzformációval közelíthetjük. Léteznek olyan sűrű illesztési módszerek, amelyek képesek kompenzálni ezeket a transzformációkat [11], de természetesen ezek gyakran számításigényes műveletek. Azt lehet megállapítani, hogy a torzulás nagyobb, ha a

bázistávolság az objektum távolságával összemérhető, valamint ha a felületi normális nem a kamera felé mutat. Ezen feltételek egyike sem tipikus a javasolt kamera elrendezés esetén, ezért nem okozunk nagy hibát, ha elhanyagoljuk a geometriai torzulást.

**Fotometrikus torzulás:** Ez a fajta hiba akkor jelentkezik, ha a kamera érzékenysége különbözőképpen lett beállítva, vagy a visszavert fény különbözik a két kamera esetén. Ez különösen a nap közelében elhelyezkedő felhőknél jelent problémát. Ebben az alkalmazásban az előre meghatározott nap pozíció alapján kitakarjuk a nap környékét, így elkerüljük a fotometrikus torzítást.

**Végtelen, takarás, homogenitás, hasonlóság:** Ezek a problémák a tipikus gyengepontjai minden sztereo algoritmusnak és a kezelésük általában nehézkes. Ebben az esetben is szükséges, hogy kielemezzük a hatásukat.

**Végtelen:** Kültéri színtereken gyakran találkozhatunk háttér objektumokkal, amelyek a végtelenben vannak. A mi esetünkben az ég pixeleit nem tudjuk illeszteni, ezeket ki kell zárunk az illesztésből. Ezt a szín alapú szegmentációval tudjuk elérni.

**Takarás:** Mivel a tipikus objektum távolság a bázistávolság többszöröse, így ritka az az eset, amikor a különböző magasságú felhők a takarás miatt nem látszanának. A felhők alsó felszíne sem mutat túl nagy térbeli változatosságot, ezért az öntakarás sem okoz nagy gondot. Mindemellett néhány kisebb kitakarás előfordul, így ezt detektálnunk kell. A kitakarás okozta hibás illesztések kiszűrésére a bal-jobb konzisztencia szűrő eljárás javasoljuk [11].

**Homogenitás:** A felhők szélei általában jól texturáltak. A textúra hiánya függ a kameráink felbontásától is. Magasabb felbontáson a textúra kevésbé nyilvánvaló, ami hibás illesztést okozhat. A piramis alapú illesztéssel meg tudjuk oldani ezt a problémát. Az illesztést a legalacsonyabb felbontáson végezzük el, majd az eredményt finomítjuk az egyes piramis szinteken.

**Hasonlóság:** A jól texturált felhő régiók egyediek, így nem okoz gondot az illesztés. Így ezt a problémát nem kell külön kezelni.



2. ábra. Felhő pixelek illesztése

### 3.3. A javasolt algoritmus

A fenti problémák megoldására a következő algoritmust javasoljuk:

1. **Légköri felhőszegmentálás**  
Kritikus lépés a *végtelenben* lévő és *homogén* tárgyak kiszűrésében. A részleteket a 4. fejezetben ismertetjük.
2. **Sűrű illesztés**  
A piramis alapú mintaillesztés használatával a *homogenitási* és *hasonlósági* problémákat tudjuk megoldani.
  - Határozzunk meg felbontási szinteket, ahol a legalacsonyabb felbontáson még látszik textúra információ.
  - Hajtsuk végre a mintaillesztést a legalacsonyabb szinten.
  - Finomítsuk az eredményeket a nagyobb felbontásokon.
3. **Konzisztencia ellenőrzés**  
A hibás pozitív illesztéseket, amelyeket a *homogenitás* vagy a *hasonlóság* okozott, bal-jobb konzisztencia ellenőrzéssel szűrjük ki:
  - Illesztés bal képről a jobb képre.
  - Illesztés jobb képről a bal képre.
  - A konzisztens illesztéseket tartjuk meg.
4. **Kitöltés**  
Ez a lépés gyakran szükséges, ha a felhő szegmentálás, vagy a konzisztencia szűrés pontokat távolít el a felhők középső területeiről. A hiányzó pixelek diszparitás értékei az

alacsonyabb felbontású piramis szintekről pótolhatóak, vagy a szomszédos pixelek alapján interpolálhatóak.

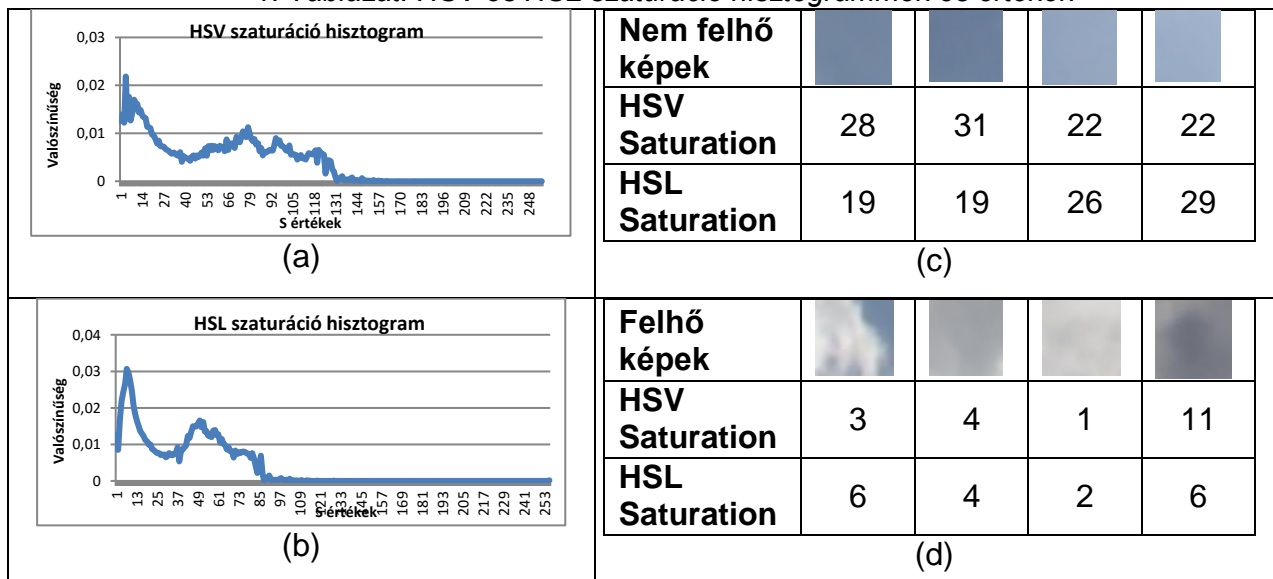
Az algoritmus végeredménye a 3. ábrán látható.

#### 4. Légköri felhők szegmentálása

A rekonstrukció egyik kritikus problémája a végtelenben lévő tárgyak rekonstruálásának megakadályozása. Általános szintér esetén az illesztés eredményét kell elemeznünk ehhez. A mi alkalmazásunkban a végtelenben lévő pixeleket könnyebben meg tudjuk különböztetni, mert ezek többségében a tiszta égbolthoz tartoznak. Ezeket a pixeleket a rekonstrukció előtt el kell távolítanunk.

Az égbolton, más kisebb objektumtól eltekintve (például: szálló objektumok, repülő, madarak, felszínihez tartozó pixelek, nap), két fő objektum típus látható: felhők és az ég. Több színmodellt is kielemeztünk és azt találtuk, hogy a szaturáció a legjobb tulajdonság a két csoport elkülönítésére.

1. Táblázat. HSV és HSL szaturáció hisztogramok és értékek

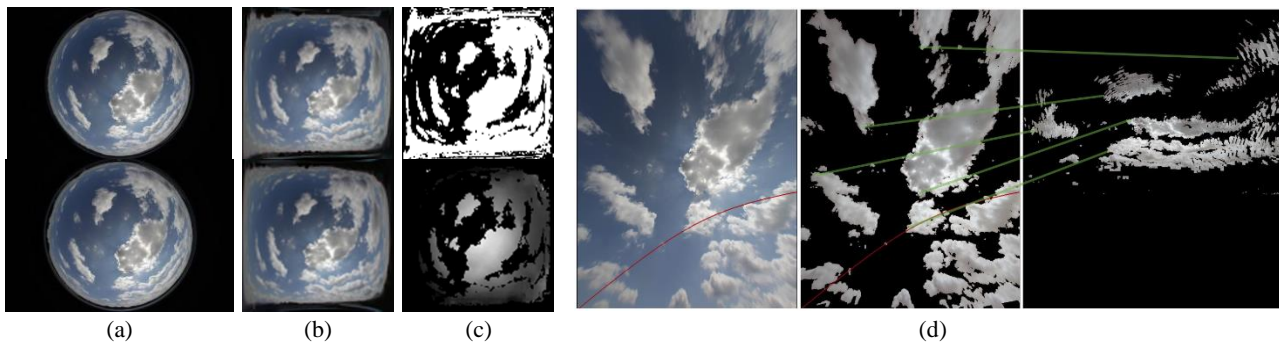


Felhő és égrészletek láthatóak a 1-c-d. táblázatban, valamint a középpontjukhoz tartozó HSV és HSL szaturáció értékek. Az 1-a-b. táblázat hisztogramjain látható, hogy a két objektum típus a szaturáció alapján automatikusan elválasztható. A két különböző szaturációból a HSL bizonyult a leghatékonyabbnak, ezért az eljárás szegmentációja ezen alapul. A szegmentáció eredményét a 3-c. ábrán láthatjuk.

#### 5. Eredmények

A javasolt és megvalósított kamerarendszer a 3-a. ábrán látható képeket készíti. A szegmentáció és a javasolt rekonstrukciós eljárás eredményeként elkészült mélység térkép a 3-c. ábrán látható. A trianguláció után létrejött 3D pontfelhőt egy saját készítésű alkalmazásban jelenítettük meg, amelyről több nézetben készített felvételek a 3-d ábrán láthatóak.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a javasolt rendszer képes az égen látható felhők szegmentálására és rekonstruálására. Az eredményként előállított 3D pontfelhő további feldolgozásával modellezni és követni lehet a felhőket. Ez számos alkalmazásban hasznosítható az űrkutatástól a meteorológiáig. A rendszer pontossága és hatékonysága tovább növelhető, ha sztereo rendszert többkamerás kamerarendszerré egészítjük ki.



3. ábra. A rekonstrukció eredményei

## Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát a TIMEC Inc. és a Pallasz Athéné Egyetem támogatta.

## Irodalomjegyzék

- [1] Calbó, J.; Sabburg, J.; 2008. Feature extraction from whole-sky ground-based images for cloud-type recognition; *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 3-14, 2008.
- [2] Dev, S.; Yee Hui Lee ; Winkler, S.; 2014. Systematic study of color spaces and components for the segmentation of sky/cloud images; *Image Processing (ICIP), 2014 IEEE International Conference on* , pp. 5102-5106, 2014.
- [3] Hartley, R.; Zisserman. A.; 2003. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 337-360, 2003.
- [4] Johnson, R. W. ; Hering, W. S.; Shields, J. E.; 1989. Automated visibility and cloud cover measurements with a solid state imaging system; University of California, San Diego, Scripps Institution of Oceanography, Marine Physical Laboratory, pp. 59-69, 1989.
- [5] Kim, H.; Hilton, A.; 2013. 3D Scene Reconstruction from Multiple Spherical Stereo Pairs; *International Journal of Computer Vision*, vol. 104, issue 1, pp. 94-116, 2013.
- [6] Li, S.; 2008. Binocular Spherical Stereo. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 9, no. 4, 2008.
- [7] Long, C. N.; Sabburg, J. M.; Calbó, J.; Pagès D.; 2006. Retrieving cloud characteristics from ground-based daytime color all-sky images; *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 23, no. 5, pp. 633–652, 2006.
- [8] Megyesi, Z.; Kos, G; Chetverikov, D.; 2006. Dense 3D reconstruction from images by normal aided matching. *Machine Graphics & Vision International Journal*; vol. 15, issue 1, pp. 3 – 28, 2006.
- [9] Mindru, F.; Tuytelaars, T.; Gool, L. V.; Moons, T.; 2004. Moment invariants for recognition under changing viewpoint and illumination. *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 94, issues 1–3, pp. 3–27, 2004.
- [10] Salman, N.; Yvinec, M.; 2010. Surface Reconstruction from Multi-View Stereo of Large-Scale Outdoor Scenes.. *International Journal of Virtual Reality*, IPI Press, 2010, *The International Journal of Virtual Reality*, vol. 9, no. 1, pp. 19-26, 2010.
- [11] Sara R. Finding the largest unambiguous component of stereo matching. In *Proceedings 7th European Conference on Computer Vision*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3, pp. 900--914, 2002.
- [12] Shields, J. E.; Karr, M. E.; Johnson, R. W.; Burden A. R.; 2013. Day/night whole sky imagers for 24-h cloud and sky assessment: history and overview; *Applied Optics*, vol. 52, issue 8, pp. 1605-1616; 2013.
- [13] Sonka, M.; Hlavac, V.; Boyle, R.; 2008. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Thomson-Engineering, pp. 566-573, 2008.