

Sztereó gépi látórendszer forgalmi sávok automatikus detektálásához és követéséhez

Bódis-Szomorú András
Virágh Bálint
Wahl István
Dr. Fazekas Zoltán
Dr. Dabóczi Tamás

A korszerű, gépjárművezetést támogató aktív biztonsági rendszerek jelentős, a világ számos országára kiterjedő interdiszciplináris kutatások és fejlesztések tárgyát képezik. A résztvevő egyetemek, kutatóintézetek, valamint ipari cégek olyan rendszerek kifejlesztésén dolgoznak, amelyek passzív és aktív szenzorok segítségével lehetővé teszik, hogy a jármű ne csak a saját belső állapotát érzékelje, hanem a dinamikusan változó, komplex forgalmi környezetéről is információt nyerjen. Ez a képesség - megfelelő automatikus beavatkozással kiegészítve - többek között megteremti a veszélyes forgalmi helyzetek automatikus elkerülésének lehetőségét is, ezzel hozzájárulva a közlekedés biztonságosabbá tételéhez. A cikk egy olyan, általunk kifejlesztett sztereó gépi látórendszert mutat be, amely a járműre szerelt kamerák képe alapján képes a jármű aktuális forgalmi sávon belüli pillanatnyi helyzetét, orientációját, valamint a sáv alakját meghatározni a sávhatároló görbék háromdimenziós rekonstrukcióján keresztül.

Advanced driving assistance systems are targets of an intense multidisciplinary research and development activity in which both academic institutions and industrial companies are participating world-wide. Equipped with active and/or passive sensors, the recently developed systems are not only capable of sensing the internal state of the vehicle, but can also gather information about the complex dynamic environment. This capability - together with an appropriate automatic intervention - makes possible the autonomous avoidance of potentially dangerous situations, that is, it primarily contributes to transportation safety. Herein, we present a novel stereo vision system that is capable of determining the vehicle's instantaneous position and orientation with respect to the actual lane, as well as, sensing the lane's profile from the video streams produced by two cameras mounted onto the host vehicle. This is performed via the 3D geometrical reconstruction of the lane boundary markings.

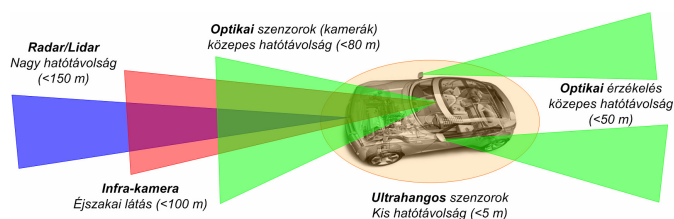
I. BEVEZETÉS

A gépjárművezetés biztonságát és hatékonyságát fokozó műszaki megoldások jelentős hányada valamilyen intelligens közlekedési infrastruktúra kiépítését teszik szükségessé. Valószínűsíthető azonban, hogy a közeljövőben bevezetésre kerülő biztonságnövelő és hatékonyságfokozó rendszerek többségét mégsem az ilyen, komoly beruházásokat igénylő rendszerek, hanem a kisebb, a gépjárműveken belül elhelyezésre kerülő rendszerek teszik majd ki.

A gépjárművek korszerű biztonsági rendszereinek kutatásával, fejlesztésével foglalkozó szakemberek számára egyértelmű, hogy a gépjárművezetést segítő rendszerek következő generációjába már mesterséges intelligencián alapuló megoldások kerülnek majd, s az is bizonyosnak tűnik számukra, hogy e rendszerek autonóm módon fognak érzékelni, határozni és beavatkozni. Ez az érzékelés vonatkozásában megköveteli, hogy e rendszerek a gépjármű környezetét folyamatosan, kellő mérési és számítási sebességgel, valamint nagy megbízhatósággal derítsék fel, rekonstruálják. Az említett rendszerek döntéshozó komponense figyelembe kell vegye a jármű dinamikai állapotát mérő érzékelők jeleit, valamint a rekonstruált környezetből kinyerhető közlekedési helyzetet. Például egy ütközés előtt működésbe lépő mechanizmus vagy program esetében felmérendő, hogy az adott forgalmi helyzet veszélyes-e vagy sem, továbbá ha veszélyes, akkor elkerülhető-e vagy sem. A felsorolt esetek ugyanis nyilvánvalóan más és más beavatkozást tesznek szükségessé. E beavatkozások lehetnek például hallható és/vagy látható (vészs)jelzések, vészfékezés, elkormányzás vagy irreverzibilis, passzív biztonsági berendezések (pl. beltéri légzsákok vagy külső, a gyalogost védő mechanizmusok) működésbe hozatala.

A jármű környezetének érzékelésére különböző technológiájú, hatótávolságú, valamint iránykarakterisztikájú szenzorok használatosak (ld. 1. ábra): rádiófrekvenciás radar és lézer-radar (lidar) kb. 150 m-

es távolságig, infravörös szenzor (főleg éjszakai látásra) kb. 100 m-ig, ultrahangos szenzorok a jármű közvetlen, 5 m-en belüli környezetének érzékeléséhez (pl. parkolássegítő rendszerhez). Ezek mellett napjainkban igen népszerű az optikai szenzorok (kamerák) alkalmazása, amelyek kb. 80-100 m-es távolságig használhatók. Az optikai szenzorok előnye, hogy passzív módon szolgáltatnak részletgazdag, vizuális információt a környezetről, így a meglévő infrastruktúra bővítése nélkül megvalósítható a gépi látás alapú sávellhagyás-detektálás; az automatikus sávtartás; a gépi segítségnyújtás a sávváltásban; az intelligens járműkövetés; az akadályokkal, járművekkel, gyalogosokkal szembeni ütközés elkerülése vagy akár ezek valamilyen kombinációja is [1,2].



1. ábra. A környezet érzékeléséhez jellemzően használt szenzor típusok és az általuk monitorozott térrész a jármű körül

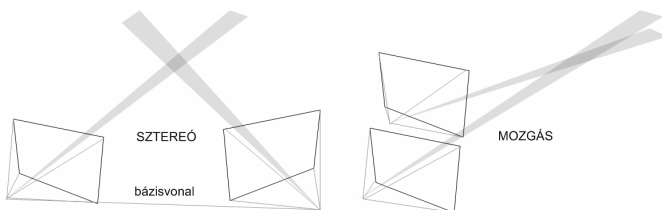
A képfeldolgozás feladata a fenti alkalmazásokban meglehetősen összetett, hiszen az alkalmazás szempontjából értékes információt el kell határolni a feldolgozandó, nagy mennyiségű, vizuális információból oly módon, hogy a feldolgozó algoritmus robusztus legyen a környezeti fényviszonyok változásaira valamint különböző részleges takarási szituációkra. Az utóbbi években nem csak a gépi látás és a többnézetes geometria területe, de a specifikusan, járműves környezetben alkalmazott technikák is hatalmas fejlődésen mentek keresztül.

tül: a fent felsorolt különböző alkalmazásokhoz számtalan új, hatékony képfeldolgozási technika, numerikus eljárás született [1,2].

Esetünkben a cél egy olyan sztereó gépi látórendszer kialakítása volt, amivel lehetővé válik a videó alapú sávelhagyás-detektálás, valamint a forgalmi sáv követése kétoldali, szabványos sávhatároló fel-festésekkel ellátott autópályákon és országutakon, nappal és éjszaka. A megvalósított látórendszer a feladatot a forgalmi sáv térbeli rekonstrukcióján keresztül valósítja meg. Sávkövetésnél a beavatkozást a gépjármű elektronikus kormányaszervója (Electric Power Assisted Steering System, EPAS) végzi.

TÉRBELI REKONSTRUKCIÓS MÓDSZEREK

Térben mozgó kamera vagy kamerák esetén a fényképek vagy az időben szukcesszív fénykép-szekvenciák (videó-folyamok) számos olyan vizuális információt tartalmaznak, amelyekből rekonstruálható a környezet geometriája, valamint a kamera relatív helyzete a környezethez képest: mesterséges, kalibrált megvilágításnál az objektumok árnyaltsága, árnyékok, textúrák, reflexiók, szimetriák, a pontok látszó mozgása (optikai mező illetve mozgásból eredő parallaxis), több nézet (több kamera) esetén az eltérés a térbeli pontok különböző képein (elrendezésből eredő parallaxis). A legfontosabb 3D-rekonstrukciós technológiák a struktúraszámítás a mozgásból (SfM, Structure-from-Motion), a formaszámítás az árnyalásból (SfS, Shape-from-Shading) és a sztereó rekonstrukció [3]. Az SfS ismert helyzetű fényforrások, ismert minőségű felületek esetén használható, így járműves környezetben az SfM és a sztereó technikák alkalmazása jön szóba. A térben mozgó kamera és a sztereó struktúra geometriai tekintetben rokon elrendezések, ezért az alkalmazott képfeldolgozási technikák sok tekintetben hasonlóak. A személygépkocsira rögzített, előre néző kamera és SfM esetén a rekonstrukciós bizonytalanság jóval nagyobb, mint sztereó esetben (ld. 2. ábra), mivel a kamera hosszirányú mozgás-komponense legtöbbször dominál.



2. ábra. A rekonstrukciós bizonytalanságok illusztrációja sztereó elrendezés esetén és mozgásból való rekonstrukció esetén.

Az SfM legtöbbször az optikai mező (látszó mozgás) számításán alapszik, és feltételezi, hogy az egyes képek a kamera kis mértékű elmozdulásai mellett készültek. Esetünkben gyorsan, akár 130 km/h-s sebességgel mozgó kamerákról beszélhetünk, így az előbbi kritérium magasabb képfrissítési időt és számításigényt von maga után. A mozgásból történő rekonstrukciót megnehezíti, hogy az alkalmazásunkban a kamera nem statikus környezetben mozog, így sok esetben nehéz automatikus módszerekkel meghatározni, hogy a képen látszó mozgás a kamera mozgásából, vagy egy látszó objektum mozgásából származik-e [3]. Mozgó kamera és dinamikus környezet esetén ugyanakkor mindig problémát jelent, hogy az optikai mező számítása és az egymástól függetlenül mozgó objektumok elkülönítése milyen sorrendben és hogyan épüljön egymásra.

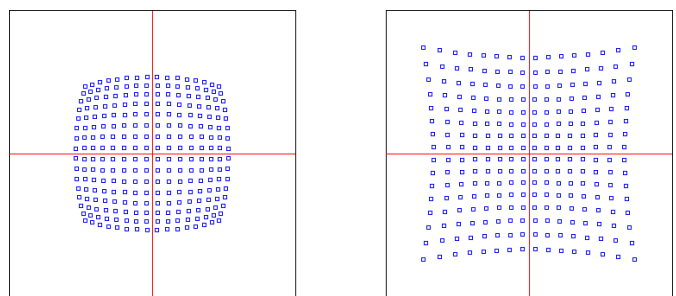
Egyetlen kamera esetén az állóképekből (tehát a mozgás figyelembe vétele nélkül) történő 3D-rekonstrukció csak abban az esetben lehetséges, ha a rekonstruálandó pontok egy – a kamera koordináta-rendszerben ismert helyzetű – felületen (pl. síkon) helyezkednek el [4]. Ennek megfelelően a monó sávdetektáló rendszerek legtöbbször feltételezik az út síkjának a helyét, és nem veszik figyelembe a ko-

csiszekrény (és ezzel együtt a kamera) billenéseit az úthoz képest [5]. A rekonstruált sávhatároló görbék párhuzamosságát kikényszerítve lehetséges a feltételezett sík helyének a korrekciója és így a kocsiszekrény billenési szögeinek a becslése, azonban a sávhatároló görbék nem mindig párhuzamosak. Ilyenkor az út síkjának meghatározásában komoly hibát okozhat, ha egy sáv beszűkül, mert meg fog szűnni.

A sztereó rendszer előnye ehhez képest nem csak az, hogy a 3D-rekonstrukció a sík helyének feltételezése nélkül is lehetséges, hanem, hogy objektumok, akadályok térbeli rekonstrukcióját is lehetővé teszik. Ilyen módon a továbbiakban a sztereó sávdetektáló rendszer továbbfejleszthető egy olyan látórendszerre, amellyel járműkövetés és ütközésselkerülés is megvalósítható [2,6]. Az eddigiiek tükrében egy sztereó rendszer kifejlesztése mellett döntöttünk.

KAMERA MODELLEZÉS

A rekonstrukciós módszerek megértéséhez és használatához szükséges a kamerák által megvalósított 3D-2D leképezés matematikai leírása (modellezése). A járműves alkalmazásban jelentős perspektív torzulást szenved el a lefényképezett 3D környezet, mivel nagy a kamerák által monitorozott mélységi tartomány az út mentén, azaz egészen közeli (<10 m) és egészen távoli (>50 m) régiókat egyaránt érzékel az optikai szenzor. A perspektív torzulásokat a perspektív lyukkamera modellel tudjuk jól közelíteni, ami centrális projekción alapszik [3,4]. A modellezett projektív leképezés homogén-koordináták alakban lineáris [4]. A leképezés 3×4 -es \mathbf{P} mátrixa a kamera mátrix, ami számítható, ha ismertek a következők: a kamera \mathbf{t} helye a jármű koordináta-rendszerében; az \mathbf{R} 3×3 -as, de csak 3 szabadságfokkal rendelkező forgatómátrix, ami a kamera orientációját írja le a jármű koordináta-rendszerében; a \mathbf{K} kamera kalibrációs mátrix, ami csak belső (intrinsic) kamera-paramétereket tartalmaz, és egy affin homogén leképezéssel modellezi a raszterizációt, azaz a világ centrális vetületének a digitális kép pixeleire való leképezését. Mivel a valós kamerák lencsési nemlineáris torzításokat okoznak a perspektív vetítés mellett, ezért a lyukkamera modellt kiegészítettük egy nemlineáris torzítási modellel, amely nem csak a domináns, a képen radiális irányú torzítást (ld. 3. ábra), hanem az ún. tangenciális torzítást, azaz a lencsék és az optikai szenzor pontatlan pozícionálásából származó torzítást is modellezi.

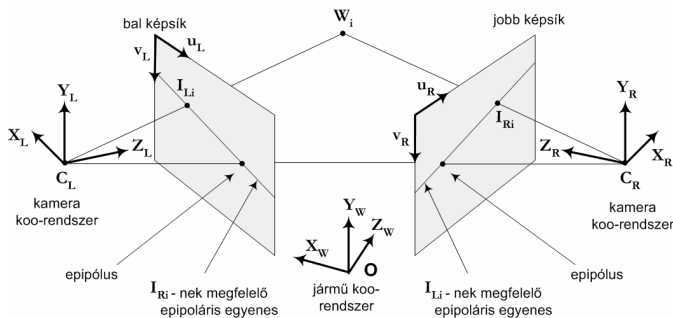


3. ábra. A radiális torzítás illusztrációja az alkalmazott torzítási modell segítségével: hordótorzítás (bal) és párnatorzítás (jobb)

A kamera pozícióját és orientációját leíró 6 független paraméter a külső (extrinsic) paraméterek. A kamera 9 belső paramétere a relatív fókusz távolságok, a tengelyferdeség, az optikai tengely dőféspontjának helye a képen, a radiális torzítás középpontja és együtthatói. Belátható, hogy amennyiben a radiális torzítás ismert, a torzítás korrigálható a képek megfelelő újramintalezésével, és ehhez a torzítási modellre van szükség, nem pedig annak inverzére. Az így kapott kép fényképezési modellje homogén koordinátákban már lineáris, mátrixa az eredeti modellből visszamaradó \mathbf{P} kamera mátrix.

EPIPOLÁRIS GEOMETRIA ÉS SZTEREÓ REKONSTRUKCIÓ

A sztereó gépi látás alapját képező kétnézetes elrendezés geometriájából – az ún. epipoláris geometriából (ld. 4. ábra) – következik az a feltétel, amely szerint, ha ismerjük az egyik nézetben egy térbeli pont képét, akkor a másik nézetben ugyan ennek a pontnak a képe egy – az elrendezés ismeretében számítható helyzetű – egyenes mentén helyezkedik el. Ez az ún. epipoláris egyenes éppen annak a vetítősugárnak a képe a második nézetben, ami az első nézetben kiválasztott ponton keresztül halad.

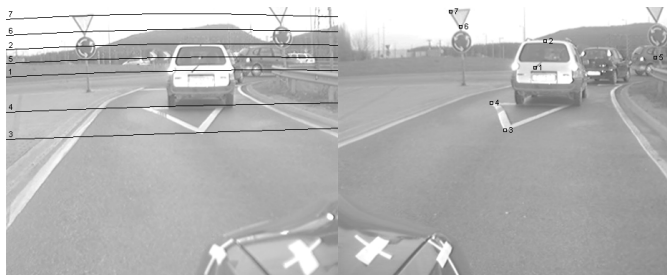


4. ábra. A két-nézetes elrendezés geometriája.

Amennyiben egy térbeli pontnak ismerjük a két képét, és a két kamera összes paraméterét, azaz a lencsetorzításokat és a két kamera mátrixát, úgy a térbeli pont helye triangulációval meghatározható (4. ábra). A gyakorlatban a két vetítősugár mindig kitérő, mivel a képpontok helye nem mérhető matematikai pontossággal, ezért különféle triangulációs módszerek alakultak ki (lineáris trianguláció, felező-pontos trianguláció, Maximum Likelihood trianguláció a zajstruktúra feltételezésével stb.) [4].

A triangulációhoz először pont-párok keresésére van szükség a két képen, amelyben segítségünkre van az epipoláris kényszer. Ezt kihasználva az első nézetben kiválasztott pontnak a második nézetben látható képét csak az epipoláris egyenes mentén kell keresni, és nem az egész képen (5. ábra). Ez nagy mértékben csökkenti a számítási igényt.

Amennyiben eltekintünk a lencsetorzítástól (vagy elhanyagolható vagy korrigáltuk), az első nézet pontjai és a második nézetben a pontoknak megfelelő epipoláris egyenesek homogén koordinátás reprezentációja között egy lineáris leképezés (ún. korreláció) teremti meg a kapcsolatot. A transzformáció mátrixa az \mathbf{F} fundamentális mátrix. \mathbf{F} az epipoláris geometriát jellemző 3×3 -as homogén mátrix, amelynek ismeretében az epipoláris egyenesek számíthatók.



5. ábra. Néhány kijelölt pont a jobb oldali képen, és a nekik megfelelő, radiálisan torzított epipoláris egyenesek a bal oldali képen a lencsetorzítások és a fundamentális mátrix ismeretében, valós közúti felvételen. Az epipoláris kényszer minden pontra teljesül.

Nagyon fontos tétel, hogy amennyiben csak \mathbf{F} ismert, nincs információ a pontos elrendezésről euklidészi értelemben, csak egy térbeli projektív transzformáció erejéig, azaz az egyik kamera mátrixa (az

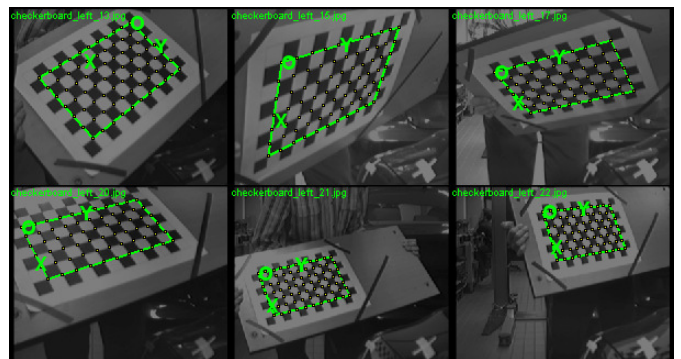
egyik projektív leképezés bázisa) tetszőlegesen megválasztható, és ehhez \mathbf{F} segítségével meghatározható a másik kamera mátrixa. Ezek után a trianguláció elvégezhető, de az így kapott rekonstrukció és a valódi euklidészi rekonstrukció között egy térbeli projektív transzformáció teremti meg a kapcsolatot, azaz csak ún. projektív rekonstrukció végezhető [4]. A járműves alkalmazásunkban azonban valódi euklidészi rekonstrukcióra van szükség, hiszen pontosan tudnunk kell, hogy a jármű koordináta-rendszerében hol helyezkednek el a térbeli pontok. Ebben az alkalmazásban tehát az epipoláris egyenesek számításához ugyan szükséges, de nem elegendő az \mathbf{F} fundamentális mátrix ismerete, szükség van külön-külön a két kamera mátrix ismeretére is. Ezekből \mathbf{F} számítható, de mint láttuk, visszafelé ez nem teljesül.

KAMERA KALIBRÁCIÓ

Amennyiben két összetartozó képen ismert legalább 7 pont-pár, úgy \mathbf{F} az epipoláris kényszerből kiszámítható a 7-pontos algoritmus segítségével (legalább 8 pont-pár esetén pedig a lineáris, 8-pontos algoritmus) [4]. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy ha semmilyen a priori információ nem áll rendelkezésre, de a két képen egy megfelelő automatikus párkeresési eljárással elegendő számú pont-párt tudunk találni, akkor \mathbf{F} számítható. Így tehát a priori információ nélkül, akár teljesen automatizáltan is, de csak projektív rekonstrukcióra van lehetőség [4]. Sajnos esetünkben ez nem kielégítő, így az a priori információt a kamera mátrixok, a kamera paraméterek ismeretét jelenti. Ezen paraméterek meghatározása a kamera kalibráció, amit előzetesen, a rendszer üzembehelyezése előtt kell elvégezni [9].

A kidolgozott eljárás két lépéses. Az első lépésben a belső kamera paraméterek meghatározása történik külön-külön a két kamerára, a második lépésben pedig a kamerák pozícióját és orientációját (a külső paramétereket) számítjuk ki a jármű koordináta-rendszerben.

A belső paraméterek meghatározásához egy ismert sík sakkasztal-szerű mintát kell a kamerának megmutatni különböző orientációkban, és róla felvételeket kell készíteni (6. ábra). A felvételeken elvégzett képfeldolgozás alapján a belső paraméterek a [7]-ben részletezett optimalizálási módszerekkel meghatározhatók. Ehhez egy saját fejlesztésű *ccalib* Matlab GUI Toolbox állt rendelkezésünkre (7. ábra).

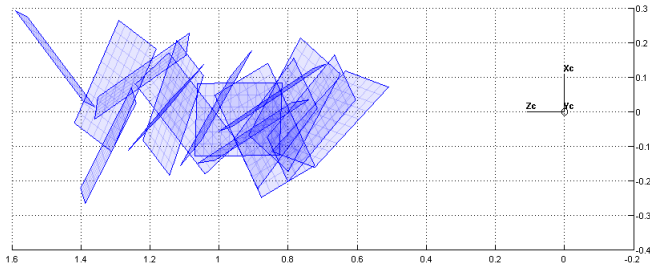
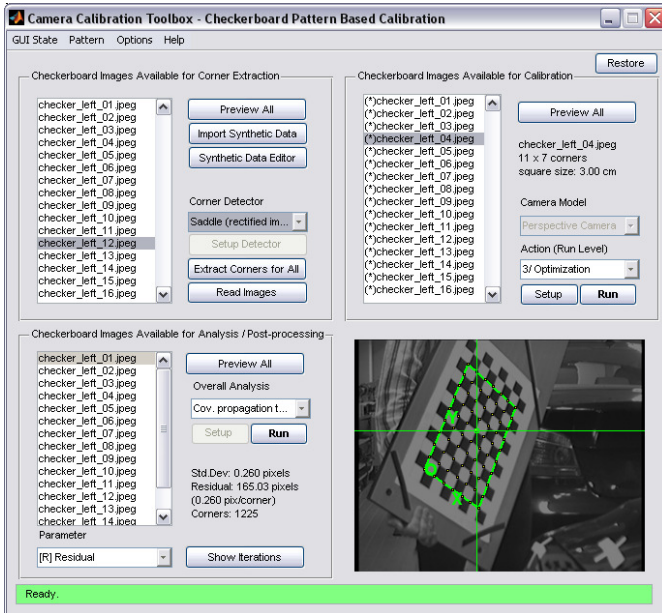


6. ábra. A belső kamera paraméterek meghatározása egy ismert sík mintáról készített felvételek alapján történt.

A *ccalib* Toolbox több, a kalibráció minőségét jellemző számítási funkcióval, kimutatással rendelkezik (zajanalízis, linearitási analízis, érzékenységi analízis, stb).

A külső paraméterek kiszámítását a már meghatározott és optimalizált belső paraméterek ismeretében egy másik saját fejlesztésű Matlab GUI Toolbox-szal végeztük (*xcalib* Toolbox). Ehhez új kalibrációs méréseket végeztünk, amelyek során a visszapiillantó tükrökhöz mereven rögzített kamerák elé egy sík marker-elrendezést alakítottunk ki a járműtől 40 m-es távolságig, az elrendezésről felvé-

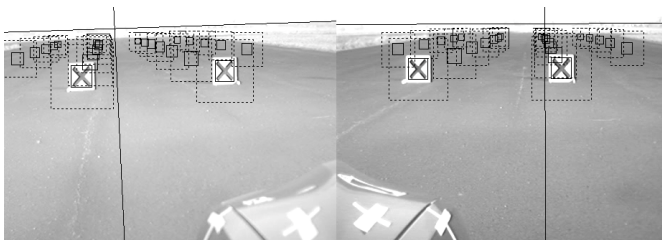
teleket készítettünk (ld. 8. ábra), majd a markerek 3D pozícióját lézeres távmérőkkel is bemértük két referenciapontból. A kalibrációs felvételeken automatikus módszerekkel megkerestük a marker-középpontok képét, majd a mérések alapján meghatároztuk a külső kamera paramétereit [8].



7. ábra. A belső kamera paramétereinek meghatározásához felhasznált saját fejlesztésű Matlab Toolbox grafikus felülete (fent) és a kalibráció során kiadódó, optimalizált minta-pozíciók (lent).

Az *xcalib* Toolbox egy olyan sztereó-optimalizálási módszert használ, ami figyelembe veszi a térbeli mérések hibáit is, és amelynek során a mért térbeli marker elrendezést (az egyes markerek térbeli helyét) együtt optimalizálja a külső kamera paraméterekkel [8,9].

A markerek megkereséséhez felhasznált keresési területek (szaggatott vonal) és az optimális kamera paraméterekkel visszavetített markerek (folytonos vonal) egyaránt láthatók a 8. ábrán. A markerek modellezett képe és a valós képük jó közelítéssel egybeesik, ami azt mutatja, hogy a kamera modellek az optimalizált kamera paraméterek mellett jól közelítik a valódi leképezést.



8. ábra. A külső kamera paramétereinek meghatározásához felhasznált elrendezésről készült, feldolgozott kalibrációs felvételek.

A kétlépéses kalibráció eredményeként – külön-külön a két kamerára – előállnak az optimalizált kamera paraméterek a jármű koordináta-rendszerében értelmezve. Ezekből összeállítható külön-külön a két kamera mátrixa valamint kiszámítható a sztereó elrendezést jellemző **F** fundamentális mátrix. Ez utóbbit a 3D pont-rekonstrukcióhoz nélkülözhetetlen pont-párosításnál fogjuk felhasználni az epipoláris egyenesek kiszámításához.

A SÁV MODELLJE

Az aktuális sáv modellje két részre osztható: az út felületének modelljére, valamint a sávhatároló görbék felülnézeti modelljére (horizontális profil). Az út-felület modellje egy paraméterekben lineáris, koordinátákban parabolikus felület:

$$y(x, z) = h + \varphi x + \vartheta z + \frac{c_v}{2} z^2,$$

ahol z a mélységi (longitudinális) koordináta a jármű hossz tengelye mentén, x a laterális koordináta (jobbról balra nő), y pedig a magassági koordináta a kocsiszekrény koordináta-rendszerében. Az út-felület modell egyúttal a jármű x -tengelye körüli billenési (ϑ) és a z -tengelye körüli csavarodási (φ) szöveget is expliciten tartalmazza.

A bal illetve jobb oldali sávhatároló görbék felülnézeti, parabolikus modellje rendre az alábbi:

$$x_L(z) = l_0 + l_1 z + c_2 z^2,$$

$$x_R(z) = r_0 + r_1 z + c_2 z^2,$$

A sávdetektáló algoritmusban a sávhatároló görbék modelljét illesztjük ugyan, a sáv tartáshoz azonban a sáv középvonalának a modelljére van szükség. A fenti modell ekvivalens az alábbival:

$$x(z) = (x_L + x_R) / 2 = c_0 + c_1 z + c_2 z^2,$$

$$w(z) = x_L - x_R = w_0 + w_1 z,$$

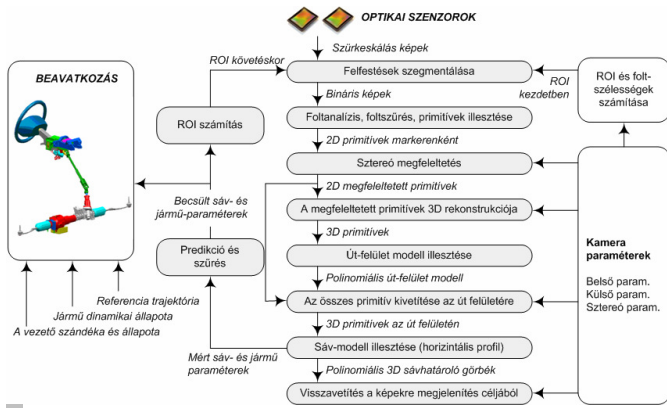
ahol $x(z)$ a sáv középvonala, $w(z)$ a sáv szélessége laterális irányban. A jármű orientációja $\psi = -\arctan(c_1)$, sávon belüli laterális pozíciója ($-c_0$), a sáv valódi szélessége pedig tetszőleges z -re könnyen számítható. Amennyiben $l_1=r_1$, a sávhatároló görbék egymás laterális irányú eltoltjai. Ha emellett $c_2=0$, akkor a sávhatároló egyenesek párhuzamosak, a sáv szélessége konstans ($w_1=0$). A gépi látás feladata tehát a $(h, \varphi, \vartheta, c_v)$ út-felület paraméterek, és a $(c_0, c_1, c_2, w_0, w_1)$ horizontális sáv-profil meghatározása a képek alapján.

A SÁVDETEKTÁLÓ ALGORITMUS

A kifejlesztett sztereó sávdetektáló algoritmus a sávhatároló görbék sztereó rekonstrukcióján alapszik. A forgalmi sávok határvonalait az útburkolati jelek határozzák meg, ezért előbb ezeket kell automatikus módszerekkel megkeresni a képeken. A megvalósított sztereó sávdetektáló algoritmus lépései a 9. ábrán láthatók.

Az útburkolati, sávhatároló felfestések szegmentálását (elkülönítését a háttértől) külön-külön végezzük el a két képen. Ehhez metrikusan meg kell adni a megkeresendő útburkolati csíkok várható szélességét és az erre vonatkozó toleranciát.

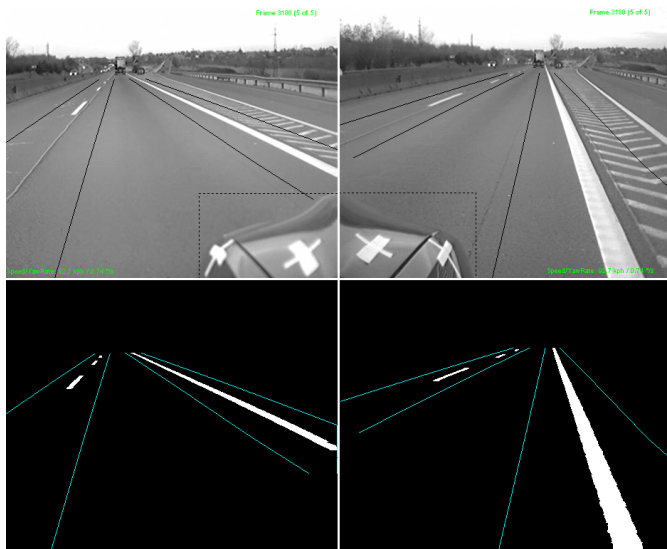
Inicializáláskor az algoritmus feltételezi a következőket: az út felülete közelítőleg az $y(x, z)=0$ sík, azaz $(h, \varphi, \vartheta, c_v)=\mathbf{0}$; a sáv középvonala a $(c_0, c_1, c_2)=\mathbf{0}$ egyenes; a sáv szélessége egy konstans w_0 érték, azaz $w_1=0$ (pl. $w_0=3$ m). A sáv-modell csak addig a z_{\max} távolságig érvényes, ameddig a képi adat alátámasztja azt (a legtovábbi detektált felfestés távolsága). Kezdetben ezt egy kisebb távolságra, pl. 15 m-re célszerű állítani. Az algoritmus futása közben a felsorolt paraméterek frissülnek. Inicializáláskor – amint a kezdeti modell által meghatározott régióban sávhatároló felfestéseket érzékel a rendszer – 2-3 szukcesszív képkocka után a paraméterek konvergálnak a valódi értékűkhöz, de sokszor az első képkocka-pár alapján megtalálja a sávot.



9. ábra. A megvalósított sztereó sávdetektáló algoritmus vázlatja.

A megadott csíkszélesség-adatok, valamint a kamera modellek ismeretében a kép egyes soraihoz tartozó látszó csíkszélességek minimumát és maximumát kiszámítjuk. A bal és jobb oldali kamera képen egyaránt leszűkítjük a sávhatároló csíkok keresési területét (Region Of Interest, ROI) a teljes képről a csíkok várható helyének környékére, ezáltal csökkentve a számításgényt (10. ábra, felül).

A meghatározott zónán belül képsoranként végezzük a felfestések szegmentálását (10. ábra, alul). A képsor mentén vett intenzitás-görbében egy ismert szélességű világos részt keresünk sötétebb háttérben. Az intenzitás-jelből eltávolítjuk a trendet és zajszűrést végzünk egyetlen lépésben, majd az eredményezett trendmentes és zajszűrt intenzitásgörbe mintáit osztályozzuk háttér- és előtér-pixelexre a két osztályon belüli intenzitás-variancia minimalizálásával.

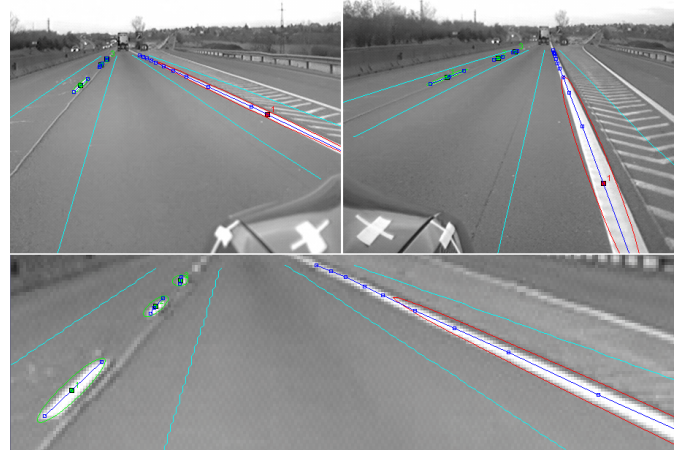


10. ábra. A kiindulási képek és a kijelölt keresési területek (fent), valamint a szegmentálás eredménye (lent).

Az így kapott bináris képeket foltanalízisnek vetjük alá, ami egy foltkeresésből (folt-címkézés), a megtalált foltok területének, excentricitásának és főtengelyének a meghatározásából és ezek alapján elvégzett foltszűrésből áll. A megmaradó foltokat osztályozzuk (rövid csík, hosszú csík) majd lineáris, illetve törtszakaszos modellt illesztünk a csíkokra (11. ábra). A törtszakaszos modell töréspontjait geometriai megfontolások alapján a perspektív torzulásnak megfelelően határoztuk meg, így a kép teteje felé haladva sűrűsödnek.

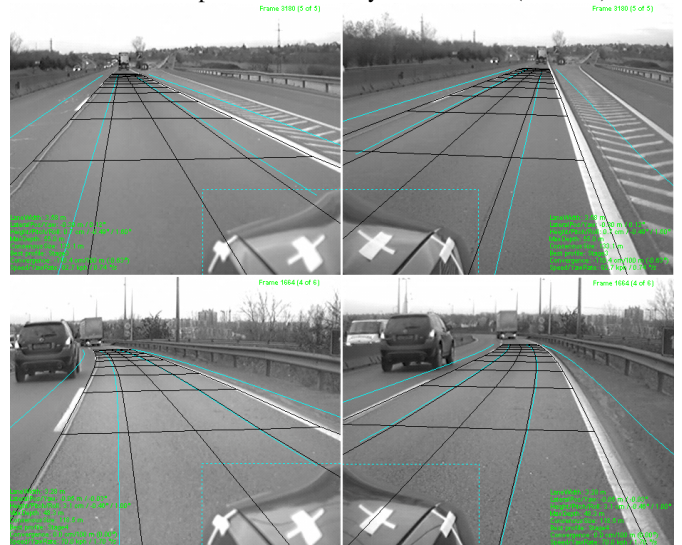
A csíkok modellezésére ezen a feldolgozási szinten azért van szükség, mert a kamerák a visszapiillantó tükrökhöz vannak rögzítve, ami aránylag nagy bázisztávolságot eredményez. Ennek megfelelően a bal és a jobb oldali kép egyes pontjait a hagyományos korrelációs mód-

szerekkel nehéz megfeleltetni, hiszen a kiválasztott pont körüli lokális torzulások jelentősek. A törtszakaszos modell előnye, hogy párkeresésnél csak a modell lineáris szegmenseinek és a megfelelő epipoláris egyenesnek a metszéspontját kell kiszámítani. Ehhez először az egyik kamerán az egyik oldali sávhatároló csíkok modelljén adott sűrűséggel felvesszünk pontokat, kiszámítjuk a hozzá tartozó epipoláris egyeneseket az F fundamentális mátrix ismeretében, majd vesszük az egyenesek és az azonos oldali sávhatároló csík-modellek metszéspontját a másik kamera képen.



11. ábra. A lineáris illetve törtszakaszos modellel leírt útburkolati jelek. Alul a bal kamera képének egy részlete van kinagyítva.

A párosított pontokat a háromdimenziós térbe háromszögeljük, így a csíkok egyes pontjainak helyét megkapjuk a kocsiszekrény koordináta-rendszerében. Az eredményezett ponthalmazra egy robusztus LS-módszerrel ráillesztjük az út-felület modelljét, majd az út-felület modellre kivetítjük az összes kontroll pontot, amely a csík modelleket meghatározza. Erre azért van szükség, mert nem mindig sikerül minden csík-modellel pontokat párosítani, és a vetítés nélkül a párosítatlan szegmensek elvesznének. A rekonstrukció eredményeként az összes csík-modellel (ld. 11. ábra) térbeli helyét ismerjük a kocsiszekrényhez képest. Ezekre a szegmensekre egy többlépéses, a RANSAC-módszerhez [4] hasonló robusztus, iteratív módszerrel illesztjük a korábban tárgyalt polinomiális sávhatároló görbe-modellel. Az eredményezett 3D sáv-modellt a kamera modellel visszavetítve a kiindulási képekre az eredmény verifikálható (12. ábra).



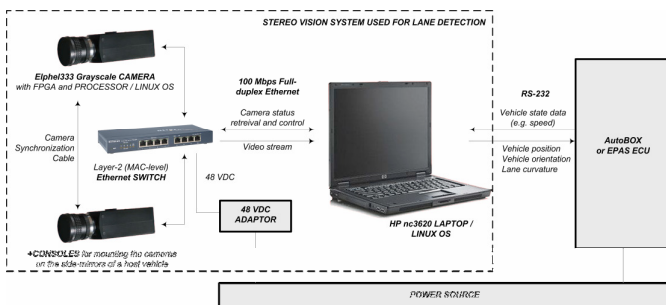
12. ábra. A megtalált sáv 3D-modelleje visszavetítve a két összetartozó forrásképre. Fent: a 10. és 11. ábrán látható képekhez tartozó eredmény. Lent: kanyarodó sáv detektálási eredménye.

A SÁV IDŐBELI KÖVETÉSE A KÉPEKEN

Az illesztett sáv-modell időbeli követését is megvalósítjuk a képeken. A jármű pillanatnyi sebességének és szögsebességének ismeretében lehetőség van a sávhatároló görbék dinamikai modellezésére. A linearizált diszkrét dinamikai modell $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k$ alakba írható, ahol $\mathbf{x}_k = (h, \varphi, \dot{c}_v, c_0, c_1, c_2, w_0, w_1)^T$ a gépi látás segítségével megmért paraméterek vektora és $\mathbf{u}_k = (v_k, r_k)^T$ a járműdinamikai jelek pillanatnyi értékeit tartalmazó vektor (v_k a jármű sebessége és r_k a pillanatnyi szögsebesség). A dinamikai modell segítségével prediktálható a sáv új helye Δt képfrissítési idő múlva. A prediktált sáv-modell és a soron következő képek alapján, képfeldolgozással meghatározott sáv-modell súlyozásával kiszámítható \mathbf{x}_k (ehhez a sáv-modell súlyozott LS-újraillesztését kell elvégezni). A megoldás előnye a szokványos Kalman-szűrős követéssel szemben az, hogy az egyetlen hangolható paraméter az említett súlyozás. Ezzel szemben a Kalman-szűrős megvalósítás a kovarianciamátrixok pontos identifikációja nélkül gyakran hibás eredményre vezet. Az identifikáció esetünkben bonyolult probléma, és a Gauss-eloszlás feltételezése sem érvényes.

A SZTEREÓ LÁTÓRENDSZER HARDVERE

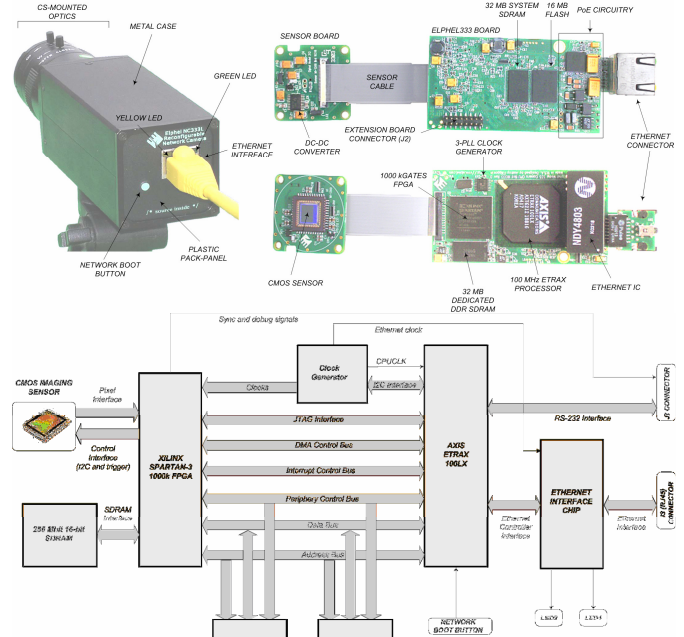
A sávdetektálás céljára kifejlesztett sztereó gépi-látórendszer „szemi” két Elphel333 típusú, digitális hálózati kamera, amelyek fekete-fehér CMOS optikai szenzorral, beépített Xilinx Spartan-3 1000 kgate-es FPGA chip-pel és egy 100 MHz-es Axis Etrax 100 LX processzorral, valamint az ezen futó Linux operációs rendszerrel vannak felszerelve. A kamerákat a visszapiillantó-tükrökhöz speciális konzolokkal rögzítjük. A képek begyűjtése és feldolgozása egy központi laptop-számítógépen történik, ami Intel Core Duo T2500 2GHz/667MHz/2MB processzorral, 1024 MB SDRAM memóriával, továbbá szabványos párhuzamos, soros és 100 Mbps sebességű Ethernet interfésszel van felszerelve. A számítógépen a kifejlesztett szoftverek szintén Linux operációs rendszer alatt futnak. A kamerákkal Ethernet interfészen keresztül lehet kommunikálni, és a tápellátást is innen kapják (Power-over-Ethernet, PoE), amit egy PoE hálózati switch biztosít (13. ábra). A számítógép soros porton keresztül képes az EPAS rendszerrel kommunikálni. Az EPAS rendszer a járműdinamikai szenzorok pillanatnyi méréseit közvetíti, a képfeldolgozó rendszer pedig a pillanatnyi jármű pozíciót, az orientációt és a sáv-paramétereket küldi el az EPAS számára.



13. ábra. A kifejlesztett sztereó látórendszer főbb egységei, valamint interfészei és tápellátása.

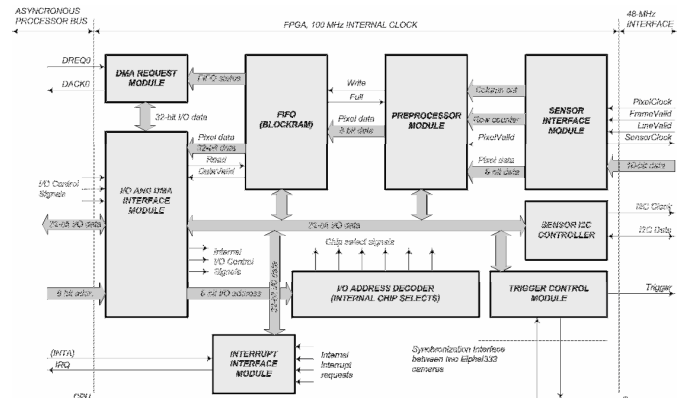
Az Elphel333 kamera hardverének felépítése a 14. ábrán látható. A kamera eredetileg egy távoli felügyeletre alkalmas hálózati kamera volt, így az FPGA-ban megvalósított logika és a kamerában futó Linux alapú szoftverek is ennek megfelelően voltak kialakítva. Ezt a rendszert átalakítottuk egy olyan sztereó gépi látórendszerre, amelyben a képfelvétel hardveres szinkronizációval működik. Ennek megfelelően az FPGA-ban megvalósított hardver-modulokat teljes egé-

szében kicseréltük, valamint a szoftver-architektúrát is átalakítottuk. Mindez meglehetősen komplex feladatnak bizonyult.



14. ábra. A sztereó sávdetektáló rendszerben felhasznált intelligens kamera hardvere (fent) és a hardver blokkdiagramja (lent).

A kamerában az optikai szenzor egy I²C-interfészen keresztül programozható, és egy adat interfészen keresztül küldi a pixeladatokat és a szinkron jeleket az FPGA-ba. Az FPGA az Etrax processzor rendszerbuszára is csatlakozik, így a CMOS szenzor és más perifériák kezelését egyaránt az FPGA-n keresztül lehet megoldani.



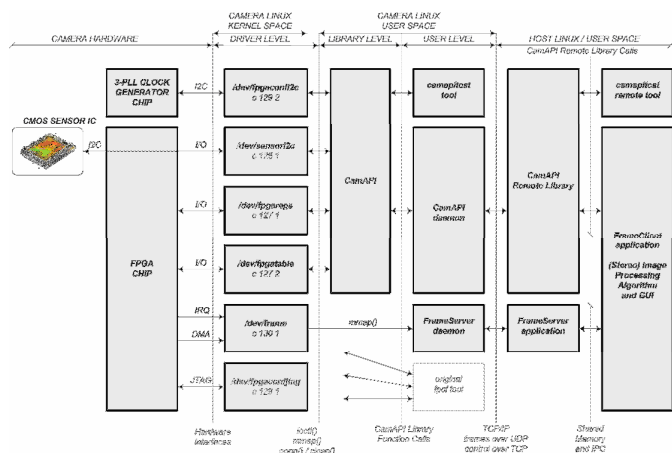
15. ábra. Az Elphel333 kamera általunk kifejlesztett új FPGA-konfigurációjának moduljai és interfészei.

Az FPGA-ban különféle konfigurációs célú regisztereket, a képérzékelő és a rendszer memória (SDRAM) közötti képátvitel megvalósításához közvetlen memória-hozzáférés (DMA) vezérlőjét, valamint az FPGA periféria-moduljai által használt megszakítás-rendszer regisztereit kellett implementálni. Ezt egészíti ki az – újabb képfeldolgozó hardver-modulok integrálásával viszonylag egyszerűen bővíthető – előfeldolgozó modul. Az Elphel333 kamerák szinkronizációs kábellel történő szinkronizálását (ld. a 13. ábrát) végző modulok is FPGA-ban lettek megvalósítva. Az új FPGA kon-

figurációban megvalósított modulok és interfészek a 15. ábrán láthatók. Az FPGA modulokat Verilog nyelven, Xilinx ISE WebPACK környezetben fejlesztettük ki.

A KAMERÁK ÚJ SZOFTVER-ARCHITEKTÚRÁJA

Az új céloknak, valamint az FPGA megváltozott interfészeinek és működésének megfelelően a kamerák szoftver-architektúráját is át kellett alakítani. A teljes szoftver keretrendszert mutatja a 16. ábra. Az ábrán nem csak a kamerán, hanem a központi számítógépen futó szoftver komponensek is fel vannak tüntetve.



16. ábra. A kifejlesztett sávdetektáló rendszer szoftver-architektúrája, ami a kamerán futó és a központi számítógépen futó komponenseket is magába foglalja.

A sávkövető rendszer szoftver-alrendszerének elsődleges feladatai a kép továbbítása az FPGA-ból az Ethernet hálózatra, valamint az optikai szenzor beállítása. A szoftver munkálatok ennek megfelelően igen szerteágazók voltak. Több Linux illesztőprogramot (kernel módú driver modulokat), egyebek közt DMA-kezelő, I²C-kommunikációs, megszakítás-kezelő illesztőprogramokat, továbbá egy programozói felületet (Camera Application Programming Interface, CamAPI) is létre kellett hozni. Ez utóbbin keresztül lehetséges függvény-hívásokkal a szenzor viselkedésének a beállítása felhasználói programokból (expozíciós idő, felbontás, ablak-pozíció stb). Megjegyzendő, hogy a CamAPI funkciói, szolgáltatásai más, a lokális hálózatra kapcsolódó számítógépeken futó alkalmazások számára is hozzáférhetőek, miközben a hálózat transzparens ezen alkalmazások számára. Ezt a szolgáltatást az ún. távoli CamAPI interfész biztosítja, ami a központi számítógépen foglal helyet (16. ábra). Meg kellett továbbá oldani az Ethernet-hálózaton keresztül történő nagy sebességű képátvitelt is a kamerától a központi számítógépbe. Az említett szoftver-komponensek mindegyikét C programozási nyelven implementáltuk és az Etrax processzor CRIS-architektúrájára a *cris-gcc* fordítóval fordítottuk le. A szoftver munkálatok részeként újragondoltuk és módosítottuk a kamera processzorán futó teljes Linux-disztribúciót, továbbá egyszerűsítettük és automatizáltuk a szoftverek fordítási, linkelési lépéseit. Ezáltal a szoftverfejlesztés egyszerűbbé, gördülékenyebbé vált.

KÉPFELDOLGOZÁS A KÖZPONTI SZÁMÍTÓGÉPEN

A központi számítógép feladata a képek fogadása két Elphel333 kamerától, a kamerák hálózaton keresztüli, távoli beállítása, a vett képek automatikus, sztereó feldolgozása, a képfeldolgozás eredményeinek a megjelenítése, valamint az EPAS rendszerrel való kommuni-

káció. Ehhez C++ nyelven egy szoftver keretrendszert valósítottunk meg, amelyben a képek fogadását és feldolgozását két külön processz végzi. A processzek között kialakított komplex képkockatovábbítási mechanizmus lehetővé teszi, hogy egy áttekinthető kialakítású, kódismétléstől mentes szoftverrel akár videó fájlokból (offline módon), akár Elphel333 kamerától fogadjunk képeket, és a kép forrása feldolgozás számára transzparens legyen. A szoftver számtalan videó fájl dekódolására képes a *libavcodec* programozói könyvtár felhasználásával. A megjelenítéshez a Simple DirectMedia Layer (SDL) multimédiás függvénykönyvtárat használjuk, így a szoftver működik a grafikus konzolon is Linux alatt, kikerülve az X ablakozó rendszert, amivel a processzor-idő jobb kihasználását érjük el. A képfeldolgozáshoz az intel cég Open Computer Vision (OpenCV) függvénykönyvtárat is felhasználjuk, ami számtalan gyakran használt képfeldolgozási rutint tömörít magába.

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS ÉRTÉKELÉS

Sokoldalú és összetett munkával megvalósítottunk egy nagy bázistávolságú, sztereó gépi látórendszert, amely az általunk kidolgozott sávdetektáló algoritmus segítségével képes a jármű-pozíció és az orientáció, valamint az aktuális sáv alakjának a meghatározására a sáv térbeli geometriai rekonstrukcióján keresztül. A munka során megoldottuk a sztereó látórendszer igényes kalibrációját, kidolgoztunk egy robotstus sávdetektáló algoritmust, valamint kifejlesztettük a látórendszer működőképes hardver- és szoftver-komponenseit. A rendszer 10 Hz képráfrítási sebesség mellett 640x480 felbontású képek feldolgozására van felkészítve.

A sávdetektáló rendszer a továbbiakban kiegészíthető lenne egy sztereó látás alapú akadály/jármű-detektálással, amivel nem csak a sávkövetés, de az ütközés-elkerülés, vagy a jármű-követés is megvalósítható lenne. Ígéretes továbbfejlesztési lehetőség még a rendszer menet közbeni, automatikus kalibrációjának megoldása, azaz a mechanikai rezgések okozta elkalibrálódás detektálása és a kamera paraméterek részleges korrekciója az epipoláris kényszer és a mozgás együttes figyelembevételével. A különböző típusú szenzorok (radar, infra, optikai) fűzőja pedig szintén egy, az ilyen rendszerek működési tartományát tágító, népszerű megoldás és kutatási irány.

Irodalom

- [1] Bertozzi, M. et al.: *Artificial vision in road vehicles*. In: *Proceedings of the IEEE*, 90(7), 2002. 1258-1271. p.
- [2] McCall, J. C., Trivedi, M. M., *Video Based Lane Estimation and Tracking for Driver Assistance: Survey, System, and Evaluation*, In: *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 7(1), 2006. 20-37 p.
- [3] E. Trucco, A. Verri, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [4] Hartley, R., Zisserman, A., *Multiple View Geometry in Computer Vision, Second Edition*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006.
- [5] Gáspár, P. et al., *Visual lane and obstruction detection system for commercial vehicles*. In: *4th IFAC Symposium on fault detection supervision and safety for technical processes*. Budapest, Hungary, 2000. 908-913 p.
- [6] Nedevschi, S. et al., *Driving environment perception using stereovision*, In: *IEEE IVS'05*, Las Vegas, Nevada, USA, 2005. 331-336 p.
- [7] Bódis-Sz., A., *Camera Calibration and Pose Estimation using Planar Features and Sensitivity Analysis*, In: *Proceedings of the 15th PhD Mini-Symposium*, Budapest, Hungary, 2008. 8-11 p.
- [8] Bódis-Sz., A., Dabóczi, T., Fazekas, Z., *A Far-Range Off-line Camera Calibration Method for Stereo Lane Detection Systems*, In: *IEEE Proceedings of the IMTC*, Warsaw, 1-3. May 2007.
- [9] Bódis-Sz., A., Dabóczi, T., Fazekas, Z., *Calibration and Sensitivity Analysis of a Stereo Vision-Based Driver Assistance System*, In: *Stereo Vision*, In-Teh, Vienna, Austria, 2008.