Upravljanje motorizirane kamere po vzoru studijske kamere z inercialno merilno enoto

Luka Žager Đurić[1], **Žana Juvan**[1], **Klemen Pečnik**[1]

[1]*Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani*
E-pošta: luka.zagerduric@lmmfe.org, zana.juvan@fe.uni-lj.si, klemen.pecnik@fe.uni-lj.si

Studio-Style Control of a Pan-Tilt-Zoom Camera Using an Inertial Measurement Unit

Abstract. *Remotely operated Pan-Tilt-Zoom cameras are traditionally controlled through dedicated panels with joysticks and buttons, providing an operating experience substantially different from that of conventional studio cameras. This paper presents the design and implementation of a simple and affordable prototype that aims to preserve the familiar studio-camera operating experience while retaining the flexibility of remotely controlled Pan-Tilt-Zoom cameras. The system is based on an inertial measurement unit and a single-board computer and can be mounted on a conventional studio tripod. It receives Game Rotation Vector quaternions from the inertial sensor, processes them according to scalable parameters configured through a web-based interface, and translates the resulting orientation changes into commands transmitted to the camera over Internet Protocol. Zoom and focus controls are integrated into the same physical operating setup, allowing the camera operator to interact with the system in a manner similar to conventional studio-camera operation. The developed prototype demonstrates the feasibility of using inertial sensing to translate physical tripod movements into remote camera control and provides a flexible basis for further development of intuitive camera operation systems.*

1 Uvod

V sodobni video produkciji se vse pogosteje uporabljajo različne daljinsko upravljane kamere PTZ (ang. *Pan-Tilt-Zoom*). Tovrstne kamere različnih proizvajalcev se razlikujejo po svojih lastnostih, pri čemer naprednejši modeli dosegajo kakovost slike, primerljivo s studijskimi kamerami. Zaradi univerzalnosti in majhnih prostorskih zahtev so primerne tako za zajem manjših dogodkov, npr. hibridne konference, kot tudi pri večjih televizijskih produkcijah. Namestiti jih je mogoče na steno, strop, nosilno konstrukcijo ali stativ, en operater pa lahko z enim krmilnikom upravlja tudi 10 ali več kamer, kar predstavlja ključno prednost njihove uporabe [1].

Studijske kamere se običajno upravljajo z dvema ročicama, ki kamermanu omogočata usmerjanje pogleda kamere ter prilagajanje goriščne razdalje (ang. *Zoom*) na eni ter ostrine (ang. *Focus*) na drugi strani. Dodatni gumbi omogočajo nastavljanje hitrosti premikanja goriščne razdalje, izbiro pogledov na zaslonu in upravljanje drugih funkcij kamere. Kamere PTZ se po drugi strani praviloma upravljajo s krmilno ročico (ang. *Joystick*), tipkovnico ali miško, pri čemer je zagotavljanje tekočega in natančnega premikanja kamere ter sočasno prilagajanje drugih nastavitev pogosto velik izziv. Odsotnost značilne izkušnje upravljanja klasične studijske kamere se zato pri uporabi kamer PTZ izkaže kot ena pomembnejših omejitev.

Pri naprednejši produkciji bi lahko z ustreznim krmilnikom, ki bi ohranil uporabniško izkušnjo upravljanja studijske kamere ter hkrati vse prednosti kamer PTZ, zagotovili bistveno višjo kakovost kadriranja. Da delo izkušenega kamermana ostaja merilo kakovosti kadriranja, potrjujejo tudi raziskave samodejnega vodenja kamer PTZ, ki se ga poskuša posnemati s strojnim učenjem [1, 2].

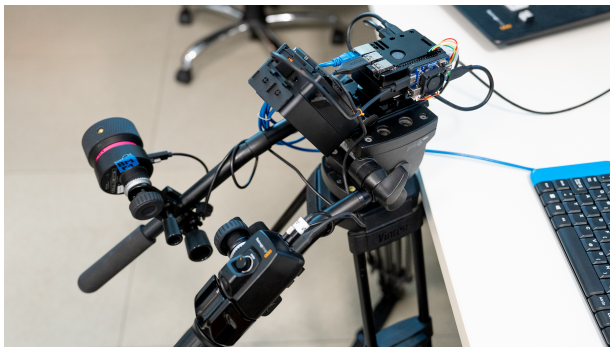
Kamere PTZ po privzetem omogočajo upravljanje preko serijskega ali omrežnega vmesnika, hkrati pa so na voljo številni moduli, ki omogočajo zelo natančno odčitavanje pozicije in premikov. Med obema deloma je potrebno vzpostaviti ustrezno povezavo in sistem namestiti na ustrezno podnožje [3, 4, 5, 6].

Na trgu že obstajajo podobne rešitve, kot je na primer DJI Force PRO, ki omogoča natančno brezžično upravljanje motoriziranih DJI stabilizatorjev, vendar zaradi omejitev proizvajalca tega sistema ni mogoče neposredno uporabiti za krmiljenje kamer PTZ. Aplikacija DJI Ronin je primer programske implementacije, ki za krmiljenje uporablja senzorje, vgrajene v pametnem telefonu, delovanje aplikacije pa je odvisno od natančnosti in odzivnosti uporabljenega mobilnega telefona in je pri tistih s slabšimi senzorji manj zanesljivo. FR-4 Fluid Remote podjetja RCT velja za eno najbolj dodelanih rešitev, ki izstopa s tekočim in natančnim krmiljenjem ter konstrukcijsko in konceptualno predstavlja zgled pri izdelavi lastne rešitve.

2 Vzpostavitev sistema

Izdelava prototipnega krmilnika za upravljanje kamer PTZ je temeljila na komponentah, ki so bile v času razvoja dostopne, s poudarkom na univerzalnosti rešitve, ki ne bi bila omejena na en tip kamere ali enega proizvajalca. Razvoj je vključeval podrobno analizo protokola za krmiljenje kamer, možnosti upravljanja in različnih načinov delovanja. Za krmilno-upravljalni del je bil izveden pregled različnih senzorjev za odčitavanje položaja in hitrosti premikanja.

Za potrebe upravljanja goriščne razdalje in ostrine je bila izvedena analiza krmilnih ročic proizvajalca Blackmagic Design, ki se v sistem povezujeta preko povezave USB-C (ang. *Universal Serial Bus Type-C*). Omenjena krmilnika, prikazana na sliki 1, omogočata primerljivo oziroma enako izkušnjo, kot je prisotna pri upravljanju objektivov studijskih ali terenskih kamer, npr. Canon in Fujinon [7].



Slika 1: Prva različica izdelanega prototipa krmilnika.

Kot jedro in krmilna enota je bil izbran enoploščni računalnik Raspberry Pi 5 s 64-bitnim štirijedrnim procesorjem Arm Cortex-A76 (2,4 GHz), grafičnim procesorjem VideoCore VII in operacijskim sistemom Raspberry Pi OS. Naprava omogoča komunikacijo prek vmesnikov USB, GPIO, Bluetooth in Wi-Fi ter zagotavlja zadostno procesorsko zmogljivost za izvajanje aplikacij v realnem času in povezovanje z zunanjimi senzorji ter krmilniki. Zmogljivejša procesna enota je bila izbrana tudi zaradi potrebe po dekodiranju signala NDI (ang. *Network Device Interface*) za prikaz video vsebin. Signal NDI se v prototipu prikazuje na iskalu pogleda. Računalnik ima vgrajen priključek USB, video vmesnik visoke ločljivosti (ang. *High-Definition Multimedia Interface – HDMI*), prek 40-kontaktnega komunikacijskega vmesnika (ang. *General-Purpose Input/Output – GPIO*) pa med drugim omogoča povezavo I^2C. Za merjenje prostorske orientacije je bila uporabljena inercialna merilna enota (ang. *Inertial Measurement Unit – IMU*), in sicer modul IMU Adafruit BNO085 (STEMMA QT/Qwiic), ki temelji na senzorju CEVA BNO085 [5] z devetimi stopnjami svobode (ang. *Nine Degrees of Freedom – 9-DoF*). Modul vključuje triosni pospeškomer, triosni žiroskop, triosni magnetometer ter vgrajen mikrokrmilnik za izvajanje algoritmov združevanja senzorskih podatkov. Izračunana orientacija se v obliki Eulerjevih kotov ali kvaternionov prek vodila I^2C posreduje osrednjemu računalniku Raspberry Pi 5. Sistem je pritrjen na klasični trinožni stativ, ki je običajno uporabljen pri kamerah ENG (ang. *Electronic News Gathering*).

Po zajemu vhodnih podatkov senzorjev in krmilnih vmesnikov je bilo treba vzpostaviti prevajalne funkcije, ki odčitane podatke pretvorijo v ustrezne ukaze ter jih posredujejo kameri. Po vzpostavitvi komunikacije je bil izveden osnovni preizkus delovanja. Na podlagi povratnih informacij so bili prilagojeni in dopolnjeni algoritmi za izračun ter posredovanje ukazov kameri. Za zagotovitev enakovredne izkušnje kamermana, kot jo ima pri upravljanju studijske kamere, je bil v sistem dodan še zaslon, ki kamermanu služi kot iskalec pogleda (ang. *view finder*). Za hitrejšo vzpostavitev povezave, kalibracijo ter upravljanje parametrov, ki vplivajo na odčitavanje, preračunavanje in posredovanje parametrov kameri, je bil na krmilni enoti vzpostavljen enostaven spletni vmesnik, ki je močno poenostavil proces preizkušanja oziroma prilagajanja načina delovanja med razvojem.

3 Rezultati

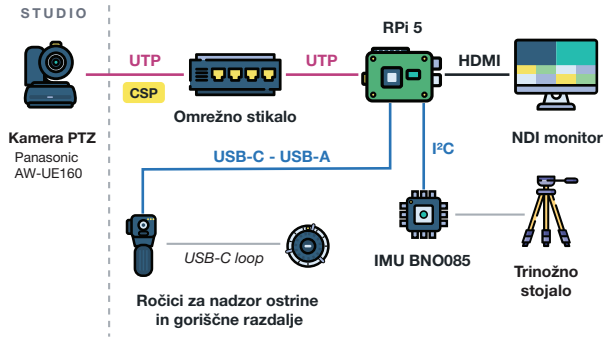
Pri sistemu za upravljanje kamere PTZ s pomočjo IMU je treba najprej opredeliti način, na katerega se gibanje upravljalne glave preslika v krmilne ukaze kamere. Glede na uporabljeno vhodno veličino in odziv kamere je mogoče razlikovati med tremi osnovnimi načini krmiljenja [8]:

- izmerjena kotna hitrost upravljalne glave se neposredno preslika v kotno hitrost kamere,
- kotni odklon upravljalne glave od nevtralnega položaja se preslika v hitrost vrtenja kamere,
- absolutna orientacija upravljalne glave se neposredno preslika v ciljno orientacijo kamere.

Pri prvem načinu je sistem občutljiv na hitrost izvedenih gibov in ne omogoča ohranjanja želene hitrosti zgolj z nespremenjenim položajem upravljalne glave. Drugi način je primerljiv s klasičnim upravljanjem kamer PTZ, kjer položaj ročice oziroma upravljalne glave določa hitrost premikanja, ne pa neposrednega položaja kamere. Tretji način je najbližji upravljanju studijske kamere, saj se usmeritev upravljalne glave neposredno preslika na smer pogleda kamere. Njegova glavna omejitev bi se pokazala ob preklapljanju med kamerami, katerih trenutne usmeritve se praviloma razlikujejo od položaja upravljalne glave. Preklop na drugo kamero bi zato lahko povzročil nenaden premik izbrane kamere proti položaju, ki ga v tem trenutku določa senzor. Težavo bi bilo mogoče zmanjšati z relativnim referenčnim odmikom, ponastavitvijo nevtralnega položaja ali začasno prekinitvijo preslikave, vendar bi to hkrati povečalo kompleksnost upravljanja. Ker je v obravnavanih scenarijih prostorsko upravljanje omejeno na eno izbrano kamero, način cikličnega sinhronega pozicioniranja (ang. *Cyclic Synchronous Position – CSP*) pa podpira absolutne ciljne položaje, je bil prototip implementiran s tretjim, orientacijskim načinom krmiljenja. Delovanje z več kamerami zato še ni bilo preizkušeno.

Krmilni ročici za upravljanje goriščne razdalje in ostrine uporabljata komunikacijski protokol proizvajalca Blackmagic Design. Računalnik ju prepozna kot standardni napravi USB-MIDI, kar omogoča zajem in interpretacijo krmilnih podatkov tudi zunaj ekosistema proizvajalca ter s tem povezovanje z napravami in programsko opremo drugih proizvajalcev. Računalnik in kamera PTZ sta bila vključena v skupno lokalno omrežje IP preko omrežnega stikala. Po isti omrežni povezavi sta potekala prenos krmilnih ukazov za usmerjanje kamere in prenos videosignala z uporabo protokola NDI. Slika 2 prikazuje arhitekturo celotnega prototipa in povezave med posameznimi komponentami.

V prvotni izvedbi programa je računalnik izvajal celotno logiko vodenja, vključno s filtriranjem in glajenjem



Slika 2: Shema sistema IMU upravljalnika kamere PTZ.

vhodnih meritev, zapiranjem pozicijske regulacijske zanke ter časovnim usklajevanjem pošiljanja krmilnih ukazov. Izbrana kamera Panasonic AW-UE160 tak način upravljanja podpira prek protokola za prenos nadbesedila (ang. *Hypertext Transfer Protocol – HTTP*) in vmesnika skupnega prehoda (ang. *Common Gateway Interface – CGI*), ki deluje nad protokolom za nadzor prenosa (ang. *Transmission Control Protocol – TCP*) in ne omogoča vzdrževanja trajnih povezav (ang. *keep-alive*). To pomeni, da je treba za vsak posamezni ukaz vzpostaviti novo povezavo TCP in jo po zaključeni komunikaciji znova zapreti.

Ker kamera v tem načinu podpira hitrostno krmiljenje, je moral program v vsakem ciklu najprej z ločeno zahtevo pridobiti trenutno pozicijo kamere in nato poslati nov ukaz za premik. Postopek vzpostavljanja in zapiranja povezave se je tako v vsakem ciklu ponovil dvakrat, kar je povzročilo komunikacijsko zakasnitev in njeno časovno nihanje (ang. *jitter*). Posledično natančno in časovno stabilno vodenje v realnem času ni bilo mogoče.

Zaradi navedenih omejitev je bila izvedena posodobitev arhitekture, ki zdaj temelji na CSP. Ta način vodenja povzema uveljavljeno načelo krmiljenja servopogonov, vendar je prilagojen komunikacijskim zmožnostim kamere Panasonic AW-UE160. Komunikacija poteka preko nepovezavnega protokola za prenos sporočil (ang. *User Datagram Protocol – UDP*), pri čemer kamera deluje kot glavna časovna referenca sistema (ang. *master clock*). Kamera računalniku ciklično pošilja signal pripravljenosti za sprejem nove ciljne pozicije. Dolžina komunikacijskega cikla je nastavljena na najmanjšo podprto vrednost 16 ms, kar ustreza frekvenci 62,5 Hz. Računalnik v vsakem ciklu iz trenutne orientacije senzorja izračuna absolutno ciljno pozicijo kamere in jo posreduje kameri. Sledenje ciljni poziciji, vključno z interpolacijo med zaporednimi ciljnimi vrednostmi, omejevanjem hitrosti ter pospeševanjem in zaustavljanjem, je prepuščeno notranji servoregulaciji kamere. Računalnik določa zaporedje ciljnih pozicij, medtem ko notranji regulator kamere zagotavlja gladko in časovno usklajeno izvedbo gibanja.

Senzor BNO085 orientacijo določa s pomočjo vgrajenega združevanja podatkov senzorjev v načinu Game Rotation Vector, ki združuje meritve žiroskopa in pospeškometra brez magnetometra ter orientacijo podaja kot enotski kvaternion q. Način brez magnetometra ni občutljiv na magnetne motnje kovinske opreme v okolici senzorja, morebitno izgubo absolutnega središča pa je mogoče odpraviti s ponovno kalibracijo.

Zasuk in nagib upravljalne glave se določata tako, da s kvaternionom zavrtimo fiksni smerni vektor f_b, ki v koordinatnem sistemu senzorja predstavlja smer glave

$$f = R(q)\mathbf{f}_b,$$

kjer $R(q)$ predstavlja rotacijo, določeno s kvaternionom q. Iz dobljenega smernega vektorja se določita azimut

$$\psi = \operatorname{atan2}(f_y, f_x)$$

in elevacija

$$\theta = \arcsin(f_z).$$

Ob kalibraciji se shranita referenčni vrednosti ψ_0 in θ_0, trenutna odmika upravljalne glave pa se nato določita kot

$$\Delta\psi = \operatorname{wrap}_{180}(\psi - \psi_0), \qquad \Delta\theta = \theta - \theta_0.$$

Tako izračunana odmika predstavljata vhodni vrednosti za nadaljnjo preslikavo v absolutna ciljna kota zasuka in nagiba kamere. Pri skoraj navpični usmeritvi smernega vektorja azimut ni enolično določen, zato krmilnik v tem območju ohrani zadnjo veljavno vrednost zasuka, kalibracija v takšni legi pa ni dovoljena.

Ker vsebina sporočil krmilnih ročic Blackmagic Design Zoom Demand in Focus Demand ni bila opisana v dokumentaciji proizvajalca, so bila sistemska ekskluzivna sporočila (ang. *System Exclusive – SysEx*) analizirana eksperimentalno z zajemom prometa USB. Z orodjem Wireshark in razširitvijo USBPcap so bila zabeležena sporočila ob premikanju obeh ročic in pritiskanju gumbov, nato pa v programski opremi preslikana v akcijska sporočila. Ročica za spreminjanje goriščne razdalje odklon vzmetne ročice (ang. *rocker*) sporoča s sporočili SysEx podtipa `0x03`. Vrednost je zapisana kot 32-bitno predznačeno število, razdeljeno na osem štiribitnih delov v zaporedju od najmanj pomembnega dela naprej (ang. little-endian), pri čemer je vsak štiribitni del prenesen v svojem podatkovnem bajtu. Takšen zapis zagotavlja, da vrednosti podatkovnih bajtov ostanejo znotraj 7-bitnega območja protokola MIDI. Ročica za ostrino uporablja podtip `0x05` in sporoča absolutni položaj mehansko omejenega obroča, gumbi pa so bitno kodirani v sporočilih podtipa `0x06`. Srednjemu gumbu je bila dodeljena funkcija enkratnega samodejnega ostrenja (ang. *One Touch Auto Focus – OTAF*).

Krmilni ročici se razlikujeta glede na način delovanja. Vzmetena ročica za nastavljanje goriščne razdalje se vrača v izhodiščni sredinski položaj, njen odklon pa določa hitrost spremembe. Obroč za ostrino nasprotno sporoča absolutni položaj med dvema končnima legama. Ker kamera v načinu CSP sprejema le pozicijske cilje, sta bila oba načina pretvorjena v enoten pozicijski zapis. Pri goriščni razdalji je hitrostna vrednost z numerično integracijo pretvorjena v absolutni položaj. Po upoštevanju mrtve cone je odklon normaliziran in oblikovan z gama krivuljo, kar omogoča natančnejši nadzor pri majhnih premikih. Izračunana vrednost se v vsakem ciklu prišteje trenutnemu položaju, pri polnem odklonu pa je celoten razpon prepotovan v vnaprej določenem času. Pri ostrini

je uporabljena neposredna linearna preslikava položaja obroča v območje ostrenja kamere.

4 Diskusija

Razvoj sistema je pokazal, da je izkušnjo upravljanja studijske kamere mogoče prenesti na kamero PTZ, hkrati pa razkril, da uporabnost takega sistema določa celotna veriga zakasnitev – od zajema giba prek odziva krmilnika do video signala kamere, kar se sklada tudi z ugotovitvami študije o sistemih za teleoperiranje [9].

Referenca za upravljanje pogleda kamere je zgolj video, ki je posredovan na iskalec pogleda, torej zaslon na sistemu za upravljanje kamere. Vsaka zakasnitev video signala, ki ga opazuje kamerman, zmanjšuje uporabnost sistema, saj se sprememba pogleda kamere na zaslonu prikaže z zamikom, kar onemogoča natančno in hitro upravljanje kamer. Na zakasnitev lahko vpliva več dejavnikov, kot so na primer ustrezna izbira protokola za prenos videa, obdelava video signala v računalniku, morebitni pretvorniki itd. Pri zasnovi prototipa je bil za prenos videa uporabljen NDI|HB (ang. *Network Device Interface | High Bandwidth*), ki je omogočal najnižje zakasnitve brez potrebe po dodatni strojni opremi. V prvotni arhitekturi, kjer je bil uporabljen način HTTP/CGI, je celotno premikanje kamere nadzoroval računalnik in kljub poskusom optimizacije proporcionalnih (P) in dušilnih (D) členov delovanja sistema ni bilo mogoče prilagoditi na način, ki bi omogočal gladko in odzivno upravljanje kamere.

S prehodom na CSP je bil servoregulacijski nadzor prenesen na kamero, s čimer je odpadla potreba po regulaciji v računalniku, preostali parametri pa ne uravnavajo več neposrednega odziva kamere, temveč vplivajo na vhodni signal. Vrednosti glajenja vhodnih podatkov senzorja omejujeta nasprotujoči si zahtevi. Premalo glajenja na kamero prenese drobno tresenje rok, ki se pri hitrih gibih ojača in povzroči opazno vibriranje. Preveč glajenja pa se odraža kot prepozna ustavitev, kjer se kamera premika tudi potem, ko je kamerman že zadržal določen položaj, kar se je izkazalo za eno najbolj motečih pomanjkljivosti. Počasno, natančno kadriranje in hitri zasuki zahtevajo različne nastavitve, zato je ena sama vrednost vedno kompromis.

Med preverjanji se je izkazalo tudi, da bi bilo smiselno parametre prilagoditi profilom uporabnikov, kar bi omogočalo dodatno optimizacijo upravljanja z možnostjo upoštevanja želja in potreb posameznega kamermana.

5 Zaključek

Razvoj prototipa potrjuje izvedljivost preslikave gibanja upravljalne glave z inercialno merilno enoto v upravljanje kamere PTZ po vzoru studijske kamere. Dodatno neformalno interno preverjanje, ki ga je z eno kamero opravilo pet sodelavcev z izkušnjami pri delu s kamerami, je potrdilo osnovno delovanje sistema ter izpostavilo nekatere robne primere, predvsem zaostajanje pri hitrih zasukih in odmik goriščne razdalje ob spustu ročice. V nadaljnjem razvoju sistema bodo odpravljene ugotovljene pomanjkljivosti, sistem bo dopolnjen z uporabniškimi profili, optimiziran bo spletni vmesnik za nastavljanje parametrov. Predvidena je tudi primerjalna uporabniška študija s kamermani različnih izkušenj in znanj. Vrednotenje bo temeljilo na objektivnih merah kakovosti sledenja in gladkosti gibanja ter na subjektivni oceni uporabnosti in obremenitve.

Razviti sistem predstavlja obetaven korak k bolj naravnemu in natančnemu upravljanju kamer PTZ, nadaljnje tehnične izboljšave in uporabniško vrednotenje pa bodo pokazali, v kolikšni meri lahko tak pristop postane učinkovita alternativa obstoječim krmilnikom.

Zahvala

Raziskavo je delno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru programske skupine »Decentralizirane rešitve za digitalizacijo industrije ter pametnih mest in skupnosti« (P2-0425).

Literatura

[1] F. Magera and J. Vounckx, “Artificial Intelligence for the Automation of Robotic Cameras in Live Sports,” in *SMPTE 2018 Annual Technical Conference & Exhibition*. SMPTE, 2018, pp. 1–11.

[2] J. Chen and P. Carr, “Mimicking Human Camera Operators,” in *2015 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*, Jan. 2015, pp. 215–222, iSSN: 1550-5790. [Na spletu]. Dostopno na: https://ieeexplore.ieee.org/document/7045890/

[3] K. Yoon, “A Case Study of PTZ Cameras in Observational Entertainment: Technical Features and Production Evolution,” *International journal of advanced smart convergence*, vol. 14, no. 3, pp. 476–488, 2025. [Na spletu]. Dostopno na: https://koreascience.kr/article/JAKO202529643225577.page?&lang=ko

[4] G. Doisy, A. Ronen, and Y. Edan, “Comparison of three different techniques for camera and motion control of a teleoperated robot,” *Applied Ergonomics*, vol. 58, pp. 527–534, Jan. 2017. [Na spletu]. Dostopno na: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003687016300886

[5] CEVA, Inc., “BNO08X Datasheet Revision 1.17,” CEVA, Inc., Datasheet, 2023. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.ceva-ip.com/wp-content/uploads/BNO080_085-Datasheet.pdf

[6] A. Pennington, “The Rise Of The PTZ Camera - The Broadcast Bridge - Connecting IT to Broadcast,” Oct. 2018. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.thebroadcastbridge.com/content/entry/12065/the-rise-of-the-ptz-camera

[7] Blackmagic Design, “Installation and Operation Manual - Blackmagic Studio Cameras,” Blackmagic Design, Manual, Mar. 2025. [Na spletu]. Dostopno na: https://documents.blackmagicdesign.com/UserManuals/BlackmagicStudioCameraManual4k.pdf?_v=1742540410000

[8] R. Reilink, G. de Bruin, M. C. J. Franken, M. A. Mariani, S. Misra, and S. Stramigioli, “Endoscopic Camera Control by Head Movements for Thoracic Surgery,” in *2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*. IEEE, 2010, pp. 510–515.

[9] J. Y. C. Chen, E. C. Haas, and M. J. Barnes, “Human Performance Issues and User Interface Design for Teleoperated Robots,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, no. 6, pp. 1231–1245, Nov. 2007. [Na spletu]. Dostopno na: https://ieeexplore.ieee.org/document/4343985/