

Tehnološki razvoj i primjena fototeodolita i videoteodolita*

Autori: Rinaldo Paar¹, Miodrag Roić¹, Ante Marendić¹ i Stjepan Miletić²

¹ Zavod za primijenjenu geodeziju, Sveučilište u Zagrebu Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb

² Zavod za fotogrametriju d.d., Borongajska cesta 71, 10000 Zagreb

Sažetak: Teodoliti su temeljni geodetski mjerni instrumenti za sve praktične geodetske zadatke, kao i za eksperimentalne geodetske znanstvene svrhe. Njihov razvoj ima dugu povijest, foto i video teodoliti predstavljaju napredni razvoj klasičnih teodolita. Njihov razvoj je započeo u 19. stoljeću, ali tek u posljednjih 15 godina postignuta je komercijalna primjena u geodetskoj struci. Najnovije razvijeni nazvan je IATS (engl. Image assisted total station), a to je teodolit koji se sastoji od klasične robotizirane totalne stanice (RTS) s integriranim slikovnim senzorom. Predstavljen je početkom 2000-tih, a sa razvojem teodolita njihova primjena postala je mnogo šira. Danas se teodoliti mogu koristiti za strukturalni i geomonitoring, odnosno za određivanje statičkih i dinamičkih pomaka i deformacija građevinskih konstrukcija poput mostova, brana, vjetroelektrana i visokih zgrada, kao i prirodnih struktura, poput padina planina. Mogu se implementirati u geodetske sustave monitoringa koji su integralni dio inženjerske strukturne dijagnostike, pružajući ključne informacije o trenutnom stanju strukture. Ovaj rad opisuje tehnološki razvoj fototeodolita i videoteodolita podijeljen prema glavnim inovacijama u njihovom razvoju. Primjena modernih videoteodolita (tj. IATS) prikazana je na nekoliko eksperimentalnih studija koje su provedene. Detaljno je opisan postupak mjerenja s ovakvim instrumentima kao i analiza prikupljenih podataka i postignutih rezultata. Prema postignutim rezultatima autori na kraju zaključuju da se IATS, danas, može koristiti za određivanje kvazi-statičkih i dinamičkih pomaka s malim i visokim amplitudama.

Ključne riječi: fototeodolit; videoteodolit; IATS; tehnološki razvoj; praćenje pomaka i deformacija; strukturalni monitoring; geomonitoring

* Ovo je prijevod članka Technological Development and Application of Photo and Video Theodolites izvorno objavljenog u časopisu: Applied Sciences 2021, 11(9), 3893; <https://doi.org/10.3390/app11093893> uz odobrenje izdavača: MDPI (Basel, Switzerland). Prijevod je pripremio: Tomislav Debeljak, mag. ing. geod. et geoinf., Vatroslava Jagića 3, 10370 Dugo Selo (tdebeljak@geoskola.hr) uz podršku autora.

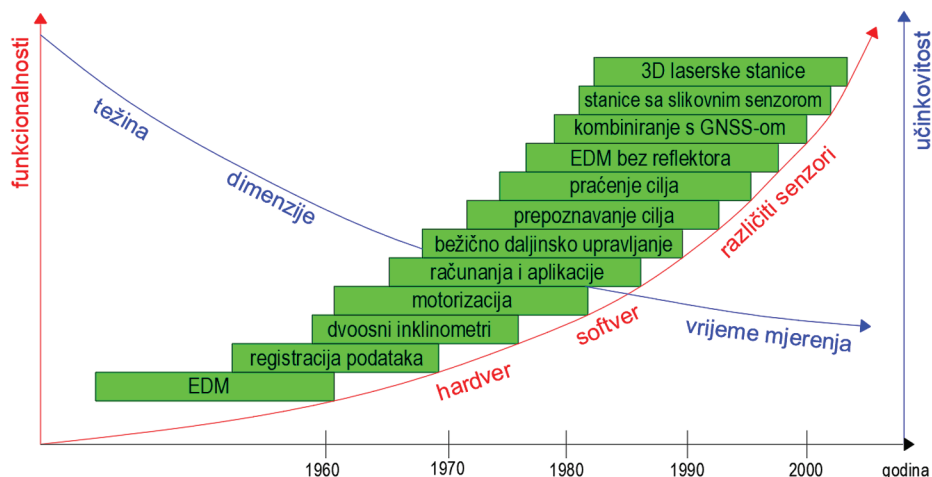
1. Uvod

Teodolit je geodetski instrument za mjerenje horizontalnih i vertikalnih pravaca, odnosno kutova u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini, a postoje optički i elektronički teodoliti [1–3]. Za određivanje položaja točaka u koordinatnom sustavu osim kutova moramo mjeriti udaljenost između instrumenta i cilja. Udaljenosti možemo mjeriti mehanički (lancima i mjernim vrpčama), optički (optičkim daljinomjerima i interferometrima) i elektronički (elektro-optičkim daljinomjerima i elektroničkim daljinomjerima – EDM). Točnost mehanički i optički mjerenih udaljenosti je niska i nije prikladna za računanje koordinata karakterističnih točaka terena. S vremenom su u teodolite ugrađene brojne tehnološke inovacije čime se značajno povećala točnost mjerenja kuta i udaljenosti. Možda najveći razvoj teodolita bio je integracija s elektroničkim daljinomjerom (EDM) koji se počeo pojavljivati oko 1940. godine i postao dostupan na tržištu krajem 1960-ih godina [4]. Vrsta EDM-a ugrađenog u moderne totalne stanice obično je elektro-optičkog tipa koji koristi infracrveno i lasersko svjetlo kao nositelje signala [3]. Instrumenti koji mogu istovremeno mjeriti kutove i udaljenosti, te zabilježiti rezultate i donekle ih obraditi nazivaju se elektroničkim tahimetrima ili totalnim stanicama (TS) [2]. Totalne stanice su elektronički digitalni teodoliti integrirani s EDM instrumentima i uređajima za elektroničko prikupljanje podataka s ciljem zamjene ručnog zapisivanja terenskih podataka, te omogućavaju elektronička očitavanja kuta i mjerenje udaljenosti [3].

Danas se u TS kombinira mnogo različitih senzora i metoda mjerenja kao što su visoko precizna očitavanja kuta, elektroničko mjerenje udaljenosti (EDM) do reflektora i do bilo koje druge površine (EDM bez reflektora), korekcija nagiba pomoću dvoosnih inklinometara, različite vrste motorizacije za horizontalno i vertikalno kretanje instrumenata, servo, piezo i magnetski motori (robotizirana totalna stanica – RTS), slikovni senzori CCD (charge-coupled device) ili CMOS (complementary metal–oxide–semiconductor) senzori (CCD ili CMOS) za automatsko fokusiranje, automatsko viziranje (tj. automatsko prepoznavanje ciljeva (automatic target recognition) i praćenje signaliziranih točaka), integracija s globalnim navigacijskim satelitskim sustavom (GNSS) pozicioniranja, bežičnom komunikacijom i radom upravljačem, dodatnim kamerama za dokumentaciju (image-assisted total station – IATS), te IATS-om s funkcijom skeniranja (image-assisted scanning total station – IASTS). Zbog brzog razvoja hardvera, kako je vidljivo na Slici 1, različite klase senzora svaka s vlastitim prednostima mogu se ujediniti, koristiti i spojiti kao jedan (gotovo) univerzalni instrument [5]. Moderne TS su multisenzorski sustavi koji mogu odrediti trodimenzionalne koordinate ciljanih točaka kombiniranjem mjerenja horizontalnih kutova, vertikalnih kutova i udaljenosti [6].

Slika 1 prikazuje tehnološki razvoj totalne stanice tijekom godina, odnosno od sredine 20. stoljeća do danas. Prikazani su glavni hardver i softver, integracija senzora i njihov utjecaj na funkcionalnosti instrumenta i učinkovitost operatera tijekom mjerenja na terenu. Nakon integracije EDM-a s osnovnim teodolitom 1960-ih godina otkad su se počeli koristiti tahimetri, očito je da su se smanjile dimenzije i težina instrumenata, potrebna sposobnost stručnjaka

vezano za metode mjerenja, kao i vrijeme provedeno na terenu. Suprotno tome funkcionalnosti instrumenta i mogućnosti za izmjernu i praćenje projekata brzo su porasle.



Slika 1. Tehnološki napredak totalne stanice.

Različite vrste motorizacije razvijene za pomicanje instrumenata u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini posebno su dizajnirane i implementirane u robotiziranu totalnu stanicu (RTS). RTS se najčešće koristi za visoko precizna mjerenja poput praćenja pomaka i deformacija građevinskih konstrukcija i Zemljine površine.

RTS s dodatno integriranim kamerama u durbinu često se naziva robotizirana stanica s integriranim slikovnim senzorima (IATS) [7]. U literaturi postoji niz alternativnih izraza za ovu klasu instrumenata [8]: fototeodolit, videoteodolit/tahimetar, laserski skener/totalna stanica i drugi. Često se pravi razlika između videa i fotografije. Ova činjenica bila je važeća u prošlosti s obzirom da su se analogni uređaji za snimanje fotografija pojavili krajem 19. stoljeća. Statični instrumenti na izravnom rotirajućem postolju s glavnom funkcijom snimanja fotografija pomoću fotogrametrijske kamere podržane teodolitom za određivanje elemenata vanjske orijentacije nazivaju se fototeodoliti [9,10].

Trenutno IATS ima moguće primjene u poluautomatskim sustavima rekonstrukcije objekata [11], potpuno automatiziranim sustavima praćenja deformacija [12], industrijskim mjernim sustavima [13], mjerenjima amplituda vibracija mjerenjem fotografije visoke frekvencije [14], snimanjem dodatnih informacija poput visokofrekventnih pokreta ili fluktuacija intenziteta uzorka pomoću senzora fotografije za derivaciju temperaturnog gradijenta atmosfere kao odlučujućeg utjecajnog parametra za kutnu refrakciju [15] i praćenje pukotina [14,16].

Ovo istraživanje daje pregled i opisuje tehnološki razvoj fototeodolita i videoteodolita podijeljenih u faze prema glavnim inovacijama u njihovom razvoju (poglavlje 2). Naglasak je stavljen na komercijalno razvijene instrumente,

međutim analiziraju se i prototipovi iz akademske sfere budući da često potiču tehnološki razvoj. Objašnjavaju se osnovna načela moderne IATS, kalibracija kamere i sustava, te postupci mjerenja i pristupi obradi podataka (poglavlje 3). Primjena IATS-a kao nasljednika fototeodolita i videoteodolita prikazana je eksperimentalnim i na terenu prethodno provedenim istraživanjima (poglavlje 4). Na kraju je prikazana rasprava s glavnim zaključcima provedenih studija.

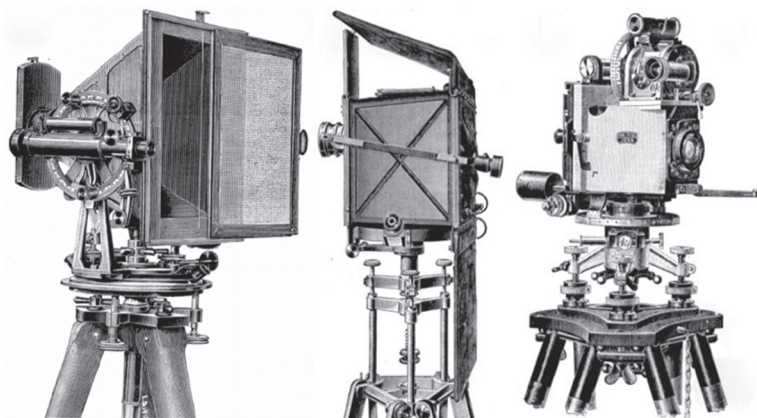
2. Tehnološki razvoj

Možemo razlikovati dvije glavne faze u razvoju fototeodolita i videoteodolita. Prva faza smatra se razdobljem kada je teodolit bio podrška fotogrametrijskim kamerama, te je nazivan fototeodolit, dok se druga faza smatra razdobljem kada je kamera postala podrška teodolitima, odnosno tahimetrima i totalnim stanicama koji su nazivani videoteodoliti.

Druga faza koja uključuje tehnološki razvoj videoteodolita može se podijeliti u četiri glavne faze prema glavnim inovacijama u njihovom razvoju. U ovom poglavlju opisuje se svaka faza, a objašnjene su i glavne inovacije.

2.1. Razvoj do 1940. godine

Fototeodoliti su poznati više od 150 godina u fotogrametriji. Glavna zasluga za uvođenje fotogrametrije pripada Aimeu Laussedatu, časniku u inženjerskom korpusu francuske vojske. Poznat je kao “otac fotogrametrije” jer je izradio prve upotrebljive kamere za terestričke radove 1851. godine [17]. Izradio je prve karte pomoću fotografija koje je snimao iz balona. Njegova daljnja istraživanja usmjerena su na terestričku fotogrametriju, te je osmislio prvi fototeodolit koji se sastojao od kamere i teodolita [18]. Kraj 19. stoljeća bio je značajan za razvoj terestričke fotogrametrije koja se primjenjivala u mnogim projektima kartiranja. Talijanska vojska razvila je fototeodolit 1889. godine (Slika 2, lijevo). Sebastian Finsterwalder napisao je svoju disertaciju 1899. godine o “osnovnoj geometriji fotogrametrije” u kojoj je riješio problem određivanja položaja stajališta dvije kamere, odnosno stereopara, neovisno o terenskim mjerenjima s četiri točke identificirane na obje fotografije, kao i metode relativne i apsolutne orijentacije. Također je razvio svoj vlastiti fototeodolit (Slika 2, sredina). Nijemac Carl Pulfrich konstrukcijom svog fototeodolita (Slika 2, desno) dizajnirao je prvi moderni stereokomparator koji je koristio principe stereofotogrametrije i x–y koordinatne skale [17,18]. Na početku je fotogrametrijska kamera kombinirana s komponentama poput uređaja za viziranje, dozne libele, cijevne libele i tronošca [19].



Slika 2. Fototeodolit talijanske vojske (lijevo), Finsterwalderov foto-teodolit (sredina) i Pulfrichov foto-teodolit (desno) [18].

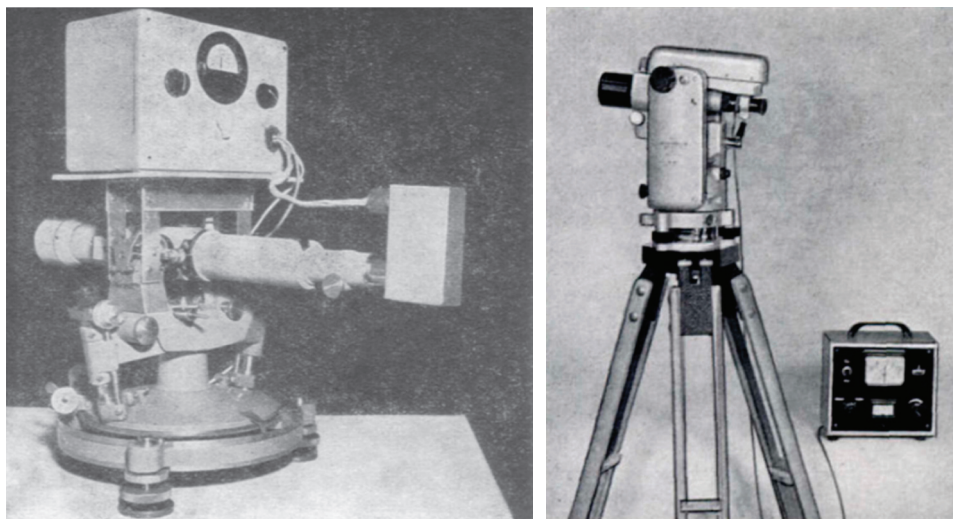
Wild je 1922. godine izradio prvi komercijalni fototeodolit Wild P30 (Slika 3, lijevo) [20]. Instrument je kombinacija kamere i teodolita i kao takav bio jedinstven u svijetu. Wildov fototeodolit bio je najtočniji sljedećih trideset godina. Povećanje dubina bilo je 28 $\times$, a očitavanje pravaca pomoću optičkog mikrometra bilo je 1". Žarišna duljina leće kamere bila je 165 mm. Težina kamere i teodolita iznosila je 27.5 kg, dok je težina potpune mjerne opreme sa svim potrebnim pomoćnim pomagalicama bila oko 65 kg. Instrument je bio primjenjiv za sve velike i male geodetske zadatke. Pouzdanost instrumenta tijekom terenskog rada u najtežim uvjetima, koji su česti tijekom istraživanja u visokim planinama, bila je jedna od njegovih glavnih prednosti. Tri godine kasnije Wild je predstavio novi model fototeodolita nazvan Wild FT9 (Slika 3, desno). Mehanička konstrukcija teodolita i kamere pojednostavila je određivanje orijentacije kamere za naknadnu fotogrametrijsku obradu.



Slika 3. Wildovi fototeodoliti P30 (lijevo) i FT9 (desno) [20].

2.2. Razvoj od 1941. do 1980. godine

Nakon Drugog svjetskog rata na Institutu za primijenjenu geodeziju u Frankfurtu razvijen je teodolit pod nazivom Electronic Eye (Slika 4, lijevo) za automatsko viziranje temeljeno na razlici između dvije struje u fotoelektričnoj čeliji. Ova metoda je dalje razvijena krajem 1950-ih kako bi omogućila točnost mjerenja pravca od 1" kao srednje vrijednosti od šest setova pravaca [21]. Testiranje je dalo vrlo dobre rezultate, pa je tvrtka Askania proizvela modificirani teodolit temeljen na Electronic Eyeu – Askania Tracking System (Slika 4, desno).



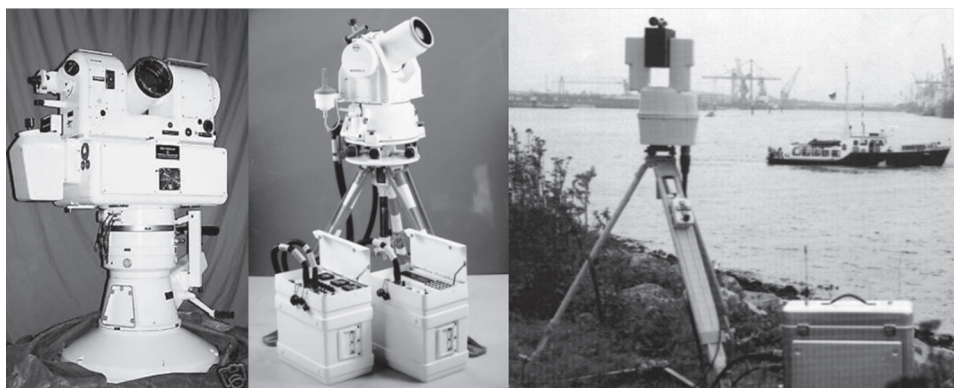
Slika 4. *Electronic Eye* iz Instituta za primijenjenu geodeziju u Frankfurtu (lijevo) i *Askania Tracking System* (desno) [21,22].

Dok je Electronic Eye mogao mjeriti samo statičke ciljeve, Askania Tracking System je već imao sposobnost registriranja orbite pokretnih objekata (zrakoplova ili rakete) tijekom Drugog svjetskog rata. Askania Tracking System koristio se kao sustav za praćenje od kraja 1950-ih do 1973. godine [23]. Kasnije se vrsta teodolita prikazana lijevo na slici počela proizvoditi u Švicarskoj pod imenom Contraves EOTS (elektro-optički sustav praćenja), a potom je proizvedena i u Kini [22]. Instrument nazvan kineteodolit koristio se za bilježenje važnih podataka tijekom testiranja raketa i zrakoplova, kao i drugih eksperimentalnih oružanih sustava. Balističke kamere koje su se koristile u satelitskoj geodeziji često su imale integrirane CCD slikovne senzore za snimanje videozapisa, a mogu se također strukturalno smatrati videoteodolitima [22].

S ciljem dokumentiranja slijetanja zrakoplova korištenjem instrumenta 1972. godine u Parizu je razvijen prijenosni Minilir sustav [22]. Sustav je razvijen kao dio unutarnjeg istraživačkog projekta SAT (Société Anonyme de Télécommunications), te nije bio samo geodetski napredak već i vojni alat za au-

tomatsko praćenje infracrvenog zračenja poput zrakoplova i ispuha projektila. Viziranje je temeljeno na detekciji svjetala zrakoplova pomoću vrlo osjetljivog infracrvenog senzora koji je snimao frekvencijski i fazno modulirani signal. Ovaj instrument koristi se od 1980-ih u kombinaciji s različitim daljinomjerima poput IBEO Fennel elektroničkog daljinomjera (EDM) ili AGA Geodimeter-112 EDM. Ovisno o tome koji EDM je bio primijenjen instrument se nazivao AGA-Minilir (Slika 5, sredina) ili Fennel-Minilir. Ovaj instrument korišten je već 1980. godine u „Dutch delta project“ za obalnu navigaciju transportnih brodova. U kombinaciji s filmskom kamerom sustav je postao poznat kao kineteodolit koji se koristio na lansirnim mjestima Kourou (Guiana Space Centre) i Cape Canaveral. U civilnoj upotrebi Minilir se koristio za kalibraciju sustava za slijetanje pomoću instrumenta [24].

Nakon Minilira, 1983. godine uslijedio je instrument Krupp Atlas-Elektronik poznat kao Polarfix (Slika 5, desno). Princip mjerenja laserom za dinamička mjerenja kratkog dometa i visoke točnosti bio je osnova Polarfixa. Polarfix je imao nekoliko prednosti i poboljšanja u usporedbi s Minilir sustavom. Dok je Minilir za pronalaženje cilja zahtijevao izvor topline, Polarfix je trebao samo pasivnu reflektirajući prizmu za praćenje cilja. Vertikalni krug automatski je kompenziran, a instrument se mogao koristiti pomoću izvora energije od 12 V umjesto od 220 V, a što je omogućilo korištenje baterija. Njegova težina i volumen bili su dva puta manji u usporedbi s Minilir sustavom. Sustav je pružao polarne koordinate za utvrđivanje položaja, uključivao potpuno automatsku funkciju praćenja bez operatera, te osiguravao utvrđivanje udaljenosti/azimuta do točnosti od $10\text{ cm} + 5\text{ cm/km}$ s jedne obalne postaje povezane s brodskom telemetrijom i reflektorima zraka. Radni domet ovisio je o vremenskim uvjetima i drugim faktorima, ali je njegov tipični osnovni domet bio malo manje od 3 km, a koji se mogao proširiti na 5 km ili više. Ovaj instrument prvenstveno je bio dizajniran za praćenje brodova na unutarnjim vodenim putovima [25]. Sedamdesete i osamdesete godine 20. stoljeća obilježila je integracija EDM-a i elektronike općenito u teodolite što je također utjecalo na uvođenje novog naziva za takve instrumente, tj. elektronički teodoliti ili elektronički tahimetri (ET) [26].



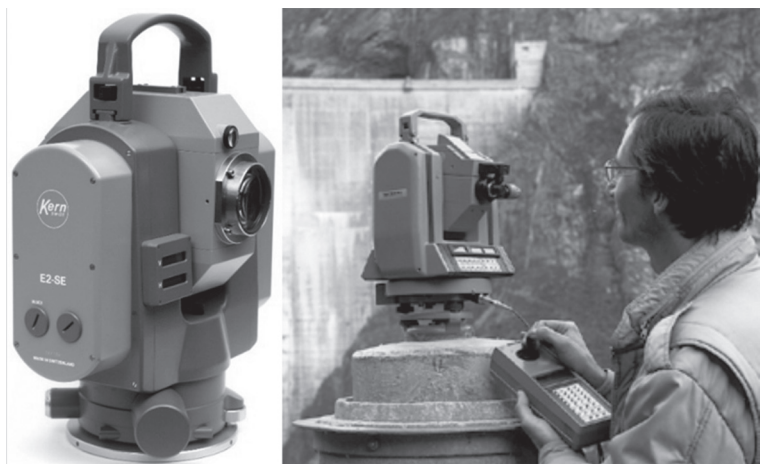
Slika 5. *Contraves EOTS kineteodolit (lijevo) [23], AGA-Minilir kineteodolit (sredina) [24], i Krupp Atlas Polarfix (desno) [22].*

2.3. Razvoj od 1981. do 1990. godine

Razvoj tijekom 1980-ih godina bio je usmjeren na mjerne sustave s teodolitom (TMS). Elektronički teodoliti (ET) u kombinaciji s integriranim kamerama, odnosno CCD slikovnim senzorima, koristili su se za mjerenje prostornim presjekom naprijed pomoću dva ili više instrumenata. Automatsko viziranje fiksnih ciljnih točaka ili projiciranih laserskih točaka ostvarivano je korištenjem tehnika analize slike [8]. Većina tih uređaja koristila se u industrijske svrhe.

Godine 1981. Geodetski institut Sveučilišta u Hannoveru preuzeo je ideju korištenja četverokvadratnih dioda u okviru „Collaborative Research Center 149“ u podprojektu pod nazivom „automatsko određivanje položaja objekta na moru pomoću tahimetra“. Poluvodički senzor položaja smješten u ravninu slike tahimetra koristio se za otkrivanje centra izvora svjetlosti smještenog na praćenom brodu. Pomoću ugrađenih servomotora instrument je mogao pratiti brod uvijek držeći izvor svjetlosti u sredini vidnog polja (FOV). Ovaj razvoj temeljio se na AGA Geodimeter 700 koji je imao beskonačne vijke za fino podešavanje i nazvan je GEOROBOT, a GEOROBOT II razvijen je kasnije na temelju instrumenta Geodimeter 710 [27,28].

Dva instrumenta koja su obilježila ovo razdoblje predstavljena su gotovo istovremeno, tj. Kern E2-SE (Slika 6, lijevo) predstavljen 1985. godine [29] i Wild TM-3000V (Slika 6, desno) predstavljen malo kasnije [30]. Ovi instrumenti razvijeni su projektima tvrtki Kern i Wild i tijekom faze projekta nazvani su Kern SPACE i Wild ATMS. Proizvođači u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji koji su koristili sustave mjerenja pomoću teodolita tijekom montaže i kontrole kvalitete svoje povećane zahtjeve temeljili su na mjerenju prostornih presjeka naprijed pomoću dva ili više instrumenata. Kako bi zadovoljili te zahtjeve Kern i Wild integrirali su CCD slikovne senzore i digitalno snimanje fotografije u teodolite sa servo motorima. Ti takozvani videoteodoliti imali su panfokalne durbine što znači da se vidno polje mijenjalo kao funkcija udaljenosti do ciljne točke. Kern E2-SE imao je CCD slikovni senzor s razlučivošću od 576×684 piksela, a fotografija je bilježena u unutarnjoj memoriji instrumenta. Bio je to prvi videoteodolit na svijetu s mogućnošću automatskog viziranja signaliziranog cilja [2]. CCD slikovni senzor koristio se za automatsko fokusiranje i određivanje položaja cilja u odnosu na optičku os durbina. Instrument je imao tri ugrađena servomotora, dva za horizontalnu i vertikalnu os i jedan za fokusiranje odnosno automatsko fokusiranje. Motori su dizajnirani tako da omogućuju postizanje točnosti pozicioniranja do $\pm 0.1''$ pri brzinama do 54° u sekundi [31]. Nakon postizanja automatskog fokusiranja i geometrijskog odnosa između ciljne točke i optičke osi teodolita pomoću algoritama obrade fotografije, instrumenti su automatski usmjeravali teodolit prema ciljnoj točki i mogla su se obaviti mjerenja. Signalizirana ciljna točka realizirana projiciranom laserskom točkom ili fiksnim obilježjem automatski je bila vizirana od strane dva ili više odgovarajućih instrumenata pomoću obrade fotografije, omogućavajući određivanje njezinih 3D prostornih koordinata [22].



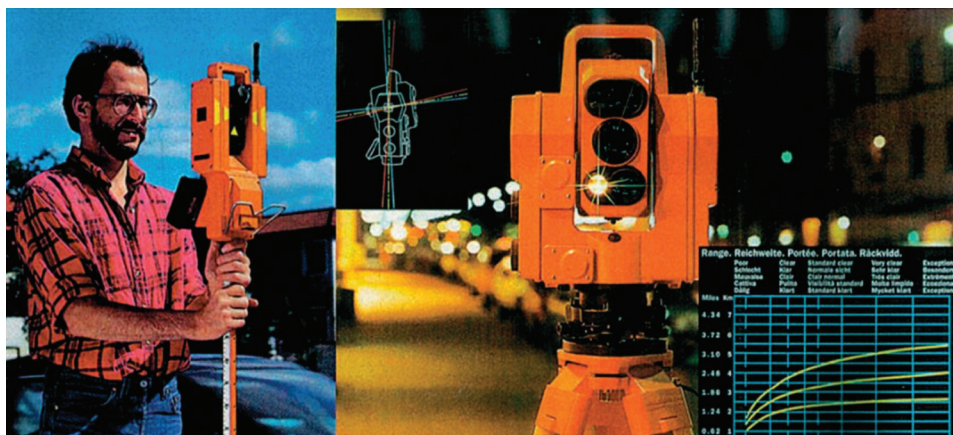
Slika 6. Videoteodoliti Kern E2-SE (lijevo) [29] i Wild TM-3000V (desno) [30].

Malo nakon Kerna tvrtka Wild predstavila je svoj model videoteodolita TM-3000V. Motorizirani videoteodolit TM-3000V bio je razvijen iz preciznog teodolita T3000. Osim motora za osi i fokusiranje leća, posebni elementi motoriziranog videoteodolita bili su kamera i procesor integrirani u teodolit. Wild TM-3000V imao je CCD slikovni senzor s razlučivošću od 500×582 piksela. Jednoosna konfiguracija kamere (integrirane u durbin) koristeći optiku teodolita bila je bolja, ali i tehnički složenija od dvoosne implementacije na durbinu koja dovodi do paralakse što je posebno štetno u situacijama gdje daljinomjeri mjere duljine prema bliskim ciljevima. Pri korištenju jednoosne konfiguracije moraju se instalirati kompleksni elementi razdjeljivanja snopa. Videoteodolit Leica TM-3000V je najbolji primjer toga i široko je korišten u akademskim istraživanjima [11]. Fotografija vidnog polja durbina na CCD polju sadrži fotografiju ciljane točke i referentni okvir ugrađen u durbin umjesto nitnog križa. Ovaj okvir definira vizurnu liniju durbina sa središtem sustava leća i koristi se istovremeno za podešavanje durbina i osi kamere. Pomoću CCD kamere može se koristiti širokokutna leća kako bi se prikazala pregledna fotografija prostora veličine $9^\circ \times 12^\circ$. Ove širokokutne leće mogu se zamijeniti optikom za precizni durbin pomoću spojnice za optiku. Međutim, umjesto širokokutnog vidnog polja, dobije se usko ograničeno vidno polje za mjerenje. Prebacivanje između mjerenja i širokokutnog vidnog polja kontrolira se softverom. Prijelaz na mjerenje vidnog polja omogućuje visoko povećanje točnosti budući da se pojedinosti objekata koji su daleko sada prikazuju na cijeloj površini senzora.

Ti instrumenti koristili su se samo za posebne primjene, a ne za standardna geodetska mjerenja, zbog svoje kompleksne morfologije koja je zahtijevala jedinicu prikaza fotografije i kontrolnu jedinicu uz instrument [32]. S lansiranjem laserskih sustava za praćenje tijekom 1990-ih godina videoteodoliti su zamijenjeni unutar nekoliko godina. To je ostao trend do 2005. godine kada je Topcon predstavio prvu komercijalno poznatu IATS GPT-7000i, koja je bila preteča današnje IATS visokih performansi. Međutim tehničke inovacije

potrebne za automatizaciju korištenja video fotografija i koje su uvedene na tržište očuvane su do danas. Na primjer, motorizirani beskonačni fini pogoni za upravljanje instrumentom kao i otkrivanje i praćenje reflektora pomoću integriranih slikovnih senzora koji su danas uobičajeni od druge generacije Wild TM-3000V. Kao i u projektu TOPOMAT instaliran je ciljni osvjetljivač u obliku infracrvenog kolimatora za trajno mjerenje deformacija na reflektorima. Ova dioda integrirana u durbin osvjetljavala je grubo približen reflektor. Reflektirani signal snimljen je na infracrveno osjetljivom CCD polju i korišten za precizno viziranje [30].

Koncept razlike između dviju struja u fotoelektričnoj ćeliji nazvan «Electronic Eye», postao je komercijalno dostupan 1987. godine kada je Geodimeter predstavio model 4000 «One-Man-System» s automatskim viziranjem cilja, te prvim instrumentom koji je zahtijevao samo jednog stručnjaka za rad (Slika 7) [22]. Od tada automatsko viziranje i praćenje cilja postali su standardne funkcije u svim TS, tj. RTS. Integrirane kamere i fotogrametrijske metode postale su pomoćni alati za teodolite. Ovaj sustav koristio je teodolit kao prijemnik aktivne vizirane točke pri čemu je durbin ovog uređaja nazvanog jedinica za udaljenu obradu (remote processing unit – RPU) morao biti usklađen s totalnom stanicom nazvanom jedinica za kontrolu i obradu (control and processing unit – CPU) kako bi olakšao grubu pretragu.



Slika 7. Geodimeter model 4000, tj. prvi «One-Man-System» na svijetu koji zahtijeva samo jednog stručnjaka za rad [22].

2.4. Razvoj od 1991. do 2000. godine

Dostupni prototipovi videoteodolita (Slika 6) tijekom 1990-ih godina potaknuli su intenzivna istraživanja o njihovoj primjeni s visokim stupnjem automatizacije. Videoteodoliti opremljeni motorima omogućili su povećanje dinamike računalom kontroliranih mjerenja pretvarajući videoteodolit u robota [33]. Ugrađeni senzori pružali su bogatstvo podataka koje je bilo potrebno značajno

obraditi kako bi se dobile potrebne informacije. Elektroničko čitanje pravaca i duljina bilo je dostupno već dugo vremena, ali obrada podataka dobivenih pomoću ugrađenih kamera bila je još uvijek u početnim fazama. Primjena metoda digitalne obrade fotografija i računalnog vida istraživana je od strane akademske zajednice. Početna istraživanja usmjerena su na pronalaženje umjetnih meta i precizno viziranje pomoću kamera [34].

Viziranje i mjerenje meta koje nisu signalizirane pokazalo se posebnim izazovom [35]. Da bi se to postiglo razvijena su rješenja temeljena na umjetnoj inteligenciji [36]. Do tada je stručnjak/operator bio odgovoran za viziranje i odlučivanje o karakterističnim točkama koje treba izmjeriti. To znanje je implementirano u softverska rješenja uz primjenu umjetne inteligencije i razvijeni su stručni sustavi. Početni razvoj bio je ograničen na manje i jednostavnije procese koji su se pojavljivali u mjerenjima teodolitom [37]. Posebna pažnja posvećena je potrebnom izoštravanju fotografije razvojem algoritama za automatsko fokusiranje [35,37].

Razvijeni procesi i postupci kasnije su implementirani u komercijalna rješenja proizvođača instrumenata. To je oslobodilo opažače od ponavljajućih operacija pri čemu su se sada mogli usredotočiti na složenije zadatke. Automatizacijom mjerenja postignuta je povećana razina točnosti. Računalno potpomognuta mjerenja i obrada podataka pružala je veću točnost od one koju je opažач mogao vizualno postići. Razvijeni sustavi mogli su se primijeniti i na mjerenja u industriji. Više nije bilo potrebno donositi objekt na mjesto mjerenja, jer se sustav mogao transportirati. Vanjska kontrola razvijenih sustava omogućila je mjerenje objekata na opasnim mjestima. Budući se moglo vizirati ciljne točke koje nisu signalizirane postalo je moguće mjerenje teško dostupnih objekata.

Na samom početku ovog razdoblja 1991. godine razvijen je automatski mjerni sustav TOPOMAT u Zürichu. U suradnji s tvrtkom Wild nadograđen je s CCD slikovnim senzorom za detekciju cilja [22]. Njegove glavne značajke bile su da je mogao raditi neovisno, automatski ili kontrolerom. Također su bile dostupne druge funkcije kontrolerom kao aktivacije, deaktivacije i promjene metode mjerenja [38]. GEOROBOT i TOPOMAT potaknuli su razvoj komercijalnih sustava praćenja u totalnim stanicama.

Prijelaz iz 1980-ih u 1990-e godine obilježen je i razvojem ATR funkcije koja je omogućila daljnji razvoj IATS instrumenata. Godine 1991. Topcon je predstavio svoju prvu motoriziranu totalnu stanicu sa automatskim praćenjem AP-S1. Godine 1993. Topcon je izdao njenog nasljednika model AP-L1, a 1996. godine pojavio se novi model AP-L1A, tzv. «one-person surveying system» [39]. Ova RTS razlikovala se od prije predstavljenih instrumenata i razvoja u finom viziranju sličnom strukturi televizijske slike, radilo se optičkim elementima za odbijanje linija (AO uređaj) i moglo je stoga procijeniti fotografiju reflektora osvijetljenu instrumentom [40]. Ovaj sustav radio je u suradnji s radio-komunikacijom, ručnim prikupljanjem podataka i programskom podrškom TDS Survey Pro. Proizveden je jedinstveni mjereni sustav koji je omogućio da sve terenske zadatke obavi jedan stručnjak koji radi sam.

Tvrtka Wild odnosno Leica od početka 1990-ih godina predstavila je svoj prvi motorizirani samovizirajući mjerni sustav s funkcijom automatskog prepoznavanja cilja koji je radio bez jedinice za vanjsku procjenu 1996. godine odnosno

model TCA1800. Ovaj sustav također je radio s CCD slikovnim senzorom i procjenjivao osvijetljenu fotografiju reflektora pomoću najprikladnijeg algoritma. S ovim instrumentom razvijen je novi tip kompaktnog reflektora koji reflektira na sve strane tj. 360° .

2.5. Razvoj od 2001. godine do danas

Predvodnik današnjih naprednih komercijalnih IATS sustava bio je Topconov model GPT-7000i iz 2005. godine (Slika 8). Topcon je integrirao kameru u teodolit stvarajući novu generaciju videoteodolita, nazvanu IATS. Instrument je bio opremljen s dvije različite VGA kamere. Jedna kamera bila je širokokutna s vidnim poljem od $28^\circ \times 22^\circ$ i fiksnim fokusom, te smještena na durbinu, omogućujući sinkronizaciju rotacije i prikaz radnog područja. Druga kamera bila je koaksijalna i snimala je detalje terena uvećanjem durbina teodolita, pa je zbog toga imala promjenjivo žarište. Imala je vidno polje koje se podudaralo s vidnim poljem durbina ($1^\circ 30' \times 1^\circ 30'$) [41]. Godine 2007. Topcon je predstavio GPT-9000Ai, nasljednika prvog modela serije. Najveći tehnološki razvoj u usporedbi s GPT-7000i očitovao se mogućnostima automatskog fokusiranja na signalne točke i daljinskog vođenja kontrolerom što je eliminiralo potrebu za opažačem, te ga tako čineći takozvanom „one-man station». Bila je to također i prva komercijalna robotizirana totalna stanica koja je omogućavala snimanje fotografija i imala mogućnost skeniranja kao jedinstvene funkcije IATS sustavom. Instrument je mogao skenirati do 20 točaka u sekundi [42]. Ove vrste IATS proizvedene su od strane Topcona u tri generacije i poznate su kao Imaging Stations, a najnoviji model naziva se IS3. Obje kamere imale su slikovni senzor s razlučivošću od 1280×1024 piksela, a također su mogle snimati videozapise pri brzini od 10 slika u sekundi (fps) koji se mogu prenositi na kontrolni ekran totalne stanice ili na ekran kontrolera.

Trimble je 2007. godine predstavio svoj prvi model IATS VX Spatial Station (Slika 8). To je u osnovi bio model S6 s dodanom funkcionalnošću 3D skeniranja i digitalnog snimanja. VX je davao fotografije koje su precizno georeferencirane. Instrument je bio opremljen kamerom u boji od 3 MPx, s fiksnim fokusom i vidnim poljem od $16.5^\circ \times 12.3^\circ$. Kamera je bila smještena na durbinu. Kasnije je ta kamera implementirana u sve modele totalnih stanica koje je Trimble izdao uključujući današnju Trimble S9 seriju. Značajke naknadne fotogrametrijske analize kalibriranih fotografija, snimanje videa od 5 slika u sekundi, mozaik panoramske fotografije i preklapanje s izmjerenim podacima poznate su kao «Trimble Vision». VX Spatial Station bila je robotizirana totalna stanica s MagDrive servo tehnologijom uključujući integrirani servo/kutni senzor elektromagnetskog izravnog pogona u kombinaciji s dodanim digitalnim snimanjem i rudimentarnim mogućnostima skeniranja. Funkcija skeniranja mogla je skenirati 20 točaka u sekundi s mogućnošću bojenja skeniranih scena na temelju snimljenih fotografija [43].

Godine 2009. Pentax je predstavio robotiziranu totalnu stanicu s integriranim kamerama u svojim instrumentima poznatu kao model Visio serije R-400VDN. Kamera je bila smještena na durbinu, a zaslon za prikaz fotografija i videozapisa s kamere također je bio postavljen na durbin iznad okulara (Slika 8).

Vidno polje bilo je $8.8^\circ \times 8.8^\circ$, a moglo je snimati videozapise brzinom od 10 sličica u sekundi [44].

Leica je predstavila svoj IATS instrument 2010. godine pod nazivom Viva. Predstavljena su dva modela s kamerama za pregled koje su postavljene na durbin: Leica TS11 i Leica TS15 (Slika 8). Model TS15 za razliku od TS11 bio je motoriziran pomoću servofokus pogona s dodatnim sensorima za automatsko i daljinsko upravljanje. Kamera za pregled imala je optičku os različitu od optičke osi durbina što je rezultiralo paralaksom. Zbog toga se središte optičke osi durbina nije podudaralo sa središtem slikovnog senzora. Relativni položaj tih dviju osi određen je kalibracijom u vrijeme proizvodnje. Učinak paralakse također se mogao ispraviti mjerenjem udaljenosti do cilja. Integrirane kamere u oba modela imale su slikovni senzor CMOS od 5 MPx s fiksnim fokusom i vidnim poljem od $15.5^\circ \times 11.7^\circ$ i s mogućnošću snimanja videozapisa brzinom od 20 sličica u sekundi [45,46].



Slika 8. Prva komercijalna IATS od Topcona (GPT-7000i) [41], od Trimblea (VX Spatial Station) [43], od Pentaxa (Visio model R-400VDN) [44] i od Leice Viva (TS11/TS15) [45].

Također treba spomenuti da je na početku ovog komercijalnog razdoblja kada su IATS sustavi došli na geodetsku scenu prvi IATS instrument zapravo predstavila Sokkia (SET3110MV) na INTERGEO-u 2002. Instrument je imao dvije integrirane kamere, preglednu kameru na durbinu i drugu kameru integriranu u durbin. Zanimljiv aspekt ovog instrumenta bio je taj što nije imao okular, umjesto toga stručnjak je mjerio pomoću daljinskog upravljača na kojem se prikazivao videozapis uživo dobiven od integriranih kamera.

Godine 2013. Leica je predstavila novu seriju nazvanu Nova s dva modela, TS50 i MS50. Instrumenti uz preglednu kameru imali su integriranu kameru u durbinu s vidnim poljem od $1.3^\circ \times 1.0^\circ$, $8\times$ digitalnim zumom pregledne kamere i $30\times$ optičkim zumom kamere durbina, kao i $8\times$ digitalnim zumom. Na taj način fotografije s kamere durbina bile su povećane $30\times$. Leica MS50 također je imala funkciju skeniranja s mogućnošću skeniranja 1000 točaka u sekundi. Leica TS50 nije imala funkciju skeniranja. Oba modela koristila su

istu motorizaciju pomoću servofokus pogona. Na temelju funkcije skeniranja s mogućnostima snimanja videozapisa i fotografija razvijen je kombinirani pristup analizi fotografija i skeniranju [47,48]. Godine 2015. Trimble je predstavio svoj najnapredniji model IATS-a model S9, koji koristi istu kameru i slikovni senzor kao i Trimble VX Spatial Station predstavljen 2007. godine. Međutim, S9 dolazi u barem 10 različitih mogućih konfiguracija. Model S9 je zamijenio VX i S8 za preciznu primjenu i primjenu na velikim udaljenostima, a pružao je veću točnost mjerenja kutova i duljina od VX Spatial Station [49]. Prethodnica današnjeg najnaprednijeg IATS-a i IASTS-a tvrtke Topcon nažalost napustila je svoj izvorni dizajn s dvije integrirane kamere u instrumentu, a 2014. godine ponudila je model IATS DS-200i s jednom preglednom ultrazvučnom kamerom na durbinu sa senzorom fotografije od 5 MPx, koja je uglavnom bila integrirana za pružanje slikovne dokumentacije i prijenos uživo na daljinski upravljač [50]. U Tablici 1 uspoređeni su Leica TS60, Trimble S9 i Topcon DS-200i prema njihovim glavnim specifikacijama i karakteristikama. Ovi instrumenti nemaju funkciju skeniranja, jer se klasificiraju kao totalne stanice, a ne kao MultiStation, iako je S9 kombinirani model s funkcijom skeniranja.

Tablica 1. Glavne specifikacije trenutno dostupnih IATS-a [49–51].

tehnički podaci	Leica TS60	Trimble S9	Topcon DS-200i
kamera/senzor	2X/CMOS	1X/CMOS	1X/CMOS
rezolucija	5MPx	3MPx	5MPx
fps	20Hz	5Hz	video uživo ¹
FOV pregled/durbin	15.5° × 11.7°/1.3° × 1.0°	16.5° × 12.3°/X	
za pregled/durbin	8×/30×	8×/X	ultraširoko ¹ /X ¹
točnost duljina (prizma)	0.6 mm + 1 ppm	0.8 mm + 1 ppm	1.5 mm + 2 ppm
točnost duljina (bez prizme)	2 mm + 2 ppm	2 mm + 2 ppm	2 mm + 2 ppm
točnost Hz i V	0.5"	0.5"	1"
funkcija skeniranja	X	·	X
godina izdanja	2015	2015	2014

¹ tehnički podaci nisu dostupni; X – nije ugrađen; · – prema izboru.

Danas Leica nudi modele TS60 i MS60 iz serije Nova predstavljene prvi put 2015. godine s poboljšanim funkcijama automatskog prepoznavanja cilja (ATR plus), samostalnim viziranjem reflektora pomoću funkcije PowerSearch, funkcijom dinamičkog promatranja, motoriziranim pogonima temeljenim na Piezo tehnologiji, poboljšanom funkcijom skeniranja s 3D laserskim skeniranjem od 30000 točaka u sekundi, snimanjem pomoću umjetne inteligencije pod nazivom „prvi pametni MultiStation“ [51].

Trimble je predstavio novu generaciju IATS instrumenata 2016. godine, tj. model SX10. To je prva komercijalna totalna stanica odnosno IATS bez okulara. Tri kamere od 5 MPx (pregledna, primarna i opća) integrirane su u durbin

nudeći maksimalno vidno polje od $360^\circ \times 300^\circ$ sa zumom od 84 $\times$. Opća kamera omogućuje vidno polje od $57.5^\circ \times 43.0^\circ$. Stručnjak upravlja instrumentom daljinskim upravljačem pomoću videozapisa uživo brzinom od 15 sličica u sekundi. SX10 kombinira podatke visoke gustoće 3D skeniranja, poboljšano snimanje pod nazivom Trimble Vision i podatke visoke točnosti totalne stanice. Koristi MagDrive servo tehnologiju i može mjeriti gusto 3D skenirane podatke do 26600 točaka u sekundi s visokom preciznosti na punom rasponu mjerenja do 600 m [52]. Postojala je određena konfuzija, čak i među Trimbleovim stručnjacima za razvoj, o tome treba li ga smatrati novim skenerom ili novom totalnom stanicom. Međutim još uvijek se klasificira kao totalna stanica zbog svojih karakteristika u vezi s durbinom, mjerenjima kutova i duljina, te mogućnošću eksplicitnog mjerenja jedne točke. Budući da kombinira snimanje sa skeniranjem na razini koja nije primitivna možemo ju nazvati prvom „imageassisted scanning total station“ (IASTS). Početkom ove godine Trimble je predstavio njenog nasljednika SX12. Tehnički podaci trenutačno ponuđeni opisuju sljedeće nadogradnje: slikovni senzori od 8.1 MPx, 107 $\times$ zumiranje glavne kamere i novi laserski pokazivač dok su preostale značajke u vezi s mjerenjima kutova i udaljenosti i funkcijom skeniranja na istoj razini kao i SX10 [53].

Topcon je predstavio svoj IASTS GTL-1000 2019. godine, a to je prva robotizirana totalna stanica i laserski skener na svijetu s ugrađenom kamerom koja se uglavnom koristi za bojenje skeniranih scena. Kamera ima slikovni senzor od 5 MPx koji se također koristi za prijenos uživo. 3D laserski skener instaliran je umjesto drške robotizirane totalne stanice što je rezultiralo rješenjem koje je istovremeno geodetska mjerna stanica i geodetski 3D laserski skener. Instrument koristi izravan pogon ultrazvučnim motorom. Glavna prednost ovog IASTS-a u usporedbi s drugim komercijalno dostupnim IASTS-ima je brzina skeniranja koja je na razini današnjih terestričkih laserskih skenera i specificirana je kao 100000 točaka u sekundi. To je prvi takav instrument na svijetu [54].

U Tablici 2 uspoređeni su Leica MS60, Trimble SX12 i Topcon GTL-1000 s njihovim glavnim specifikacijama i karakteristikama. Svi instrumenti imaju funkciju skeniranja i klasificiraju se kao multi-stanice, tzv. IASTS. Ova tri instrumenta trenutno predstavljaju najnaprednije geodetske instrumente na svijetu.

Tablica 2. Glavne specifikacije trenutno dostupnih IASTS-a [51,53,54].

tehnički podaci	Leica MS60	Trimble SX 12	Topcon GTL-1000
			
kamera/senzor	2X/CMOS	3X/CMOS	1X/CMOS
rezolucija	5MPx	8.1MPx	5MPx
fps	20Hz	15Hz	video uživo ¹
FOV pregled/durbin	15.5° × 11.7°/1.3° × 1.0° ² ukupno 360° × 300°		270° × 360°/X ¹
za pregled/durbin	8×/30×	107× ³	ultraširoko ¹ /X ¹
točnost duljina (prizma)	1 mm + 1.5 ppm	1 mm + 1.5 ppm	1 mm + 2 ppm
točnost duljina (bez prizme)	2 mm + 2 ppm	2 mm + 1.5 ppm	2 mm + 2 ppm
točnost Hz i V	0.5″	1″	1″
funkcija skeniranja	30000 Hz	26600 Hz	100000 Hz
godina izdanja	2020	2021	2019

¹ tehnički podaci nisu dostupni; ² vidno polje od sve tri kamere; ³ zum glavne kamere; X – nije ugrađen.

Svi trenutno dostupni komercijalni IATS i IASTS instrumenti koriste snimljene fotografije i videozapise za dodatne attribute mjerenih točaka, tj. uglavnom za dokumentaciju i bojenje skeniranih scena. Standardne metode mjerenja na terenu uvelike su razvijene i poboljšane tehnološkim napretkom totalne stanice. Ručno fokusiranje zamijenjeno je automatskim fokusiranjem, osim toga pomoću daljinskog upravljanja stručnjak može odabrati točku interesa definiranu pikselom s videozapisa/fotografije uživo na zaslonu čime usmjerava instrument prema signaliziranoj ili točki koja nije signalizirana. Za usmjeravanje instrumenta prema točki interesa i praćenje reflektora na terenu instrumenti koriste motorizaciju koja se trenutno ostvaruje pomoću piezo, magnetskih ili ultrazvučnih pogona ovisno o proizvođaču. Snimljene fotografije mogu se automatski preuzimati za svaku točku ili za set točaka u svrhu dokumentacije. Na taj način moguće je vizualizirati te točke. Štoviše, možemo naknadno fotogrametrijski obraditi prikupljene georeferencirane fotografije i npr. koristiti ih za strukturalni monitoring i geomonitoring, nivelirati i spojiti podatke laserskog skeniranja i fotografije za praćenje deformacija. Međutim, komercijalni IATS i IASTS instrumenti još uvijek ne koriste puni potencijal i funkcije ovih instrumenata [8]. U sljedećem poglavlju predstavljen je potencijal primjene najnaprednijih IATS.

3. Pristupi mjerenju i obradi

Ovisno o razvijenom hardveru i softveru, integriranim senzorima i različitim funkcijama implementacijom različitih algoritama u totalnim stanicama možemo razlikovati vrste totalnih stanica sukladno Tablici 3.

Tablica 3. *Različite vrste totalnih stanica prema integriranim senzorima i funkcijama.*

	TS	RTS	IATS	IASTS
EDM	√	√	√	√
EDM bez reflektora	•	•	√	√
registracija podataka	√	√	√	√
motorizacija	X	√	√	√
slikovni senzor	X	√/•	√	√
automatsko viziranje	X	√/•	√	√
praćenje cilja	X	√/•	√	√
formiranje fotografije	X	X	√	√
skeniranje	X	X	X/•	√

√ – ugrađen; X – nije ugrađen; • – prema izboru.

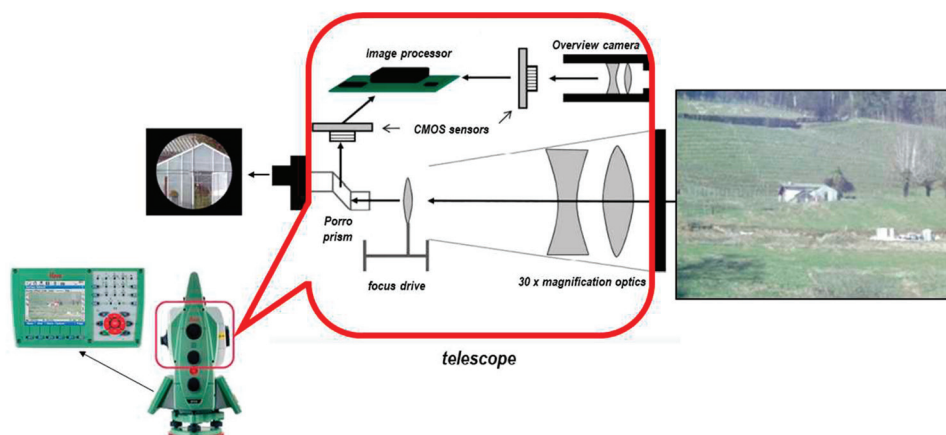
Najsuvremeniji IATS i IASTS instrumenti predstavljaju novu vrstu robotiziranih totalnih stanica, objedinjujući geodetsku preciznost totalne stanice s prikazom područja fotografijama, kao i laserskim skeniranjem. IATS korisnicima nude sustav snimanja fotografija s integriranim kamerama koje koriste slikovni senzor i polarni 3D sustav za mjerenje točaka. IASTS su opremljene funkcijom skeniranja sa manjim brzinama skeniranja u usporedbi s klasičnim terestričkim laserskim skenerima. Najveća prednost korištenja takvog (multi-senzorskog) instrumenta je zajednički koordinatni sustav svih ugrađenih senzora pod uvjetom da je pružena odgovarajuća a priori kalibracija [55].

Ovi multi-senzorski sustavi mogu snimati fotografije za dokumentaciju i fotogrametrijska mjerenja, a čak mogu spojiti više tih snimljenih fotografija u panoramski mozaik fotografije rotacijom kamere, odnosno rotacijom durbina. S odgovarajućom kalibracijom, te fotografije su točno georeferencirane i orijentirane, tako da se mogu odmah koristiti za mjerenja pravaca bez potrebe za kontrolnim točkama ili daljnjim postupcima fotogrametrijske orijentacije [15].

3.1. Osnovni principi IATS-a

Kombinacija kamere s slikovnim senzorima i teodolita opisana je davno od strane [29,56]. U ovom odjeljku objašnjavamo osnovne radne principe najsuvremenije IATS Leica MS50 koji su također primjenjivi na MS60 i na IATS s dvije kamere (pregled i durbin) drugih proizvođača. Pregledne i kamere durbina nude mogućnost snimanja fotografija visoke razlučivosti ili panoramskih

mozaika fotografija koje se mogu izravno povezati i referencirati na mjerni 3D sustav točaka. Ove fotografije se mogu koristiti za terensku dokumentaciju i, što je najvažnije, za a posteriori fotogrametrijsku obradu. Fotogrametrijska rezolucija od 1 px durbinske kamere odgovara 5 cc što rezultira razlučivosti od 2 mm na 200 m [57]. Stručnjak koristi preglednu kameru za grubo usmjerenje prema signaliziranom cilju ili cilju koji nije signaliziran. Pregledna kamera daje pregled područja izmjere, a alternativno je moguće promatrati i video uživo na zaslonu instrumenta. Koristeći durbinsku kameru koja je smještena na optičkoj osi stručnjaku je na raspolaganju uvećanje durbina od 30× za vrlo precizno viziranje cilja (Slika 9).



Slika 9. Shematski presjek durbina Leica MS50 s integriranim slikovnim sensorima, procesorom i motorizacijom za automatsko fokusiranje; shema modificirana za ovu studiju prema [57].

Ostvariva točnost mjerenja kutova pomoću ove kamere je 1". Korištenjem integriranog slikovnog senzora moguće su funkcije pojedinačnog automatskog fokusiranja i kontinuiranog automatskog fokusiranja. Integracija slikovnog senzora obavljena je na način da je fokusirana fotografija istodobno vidljiva na zaslonu instrumenta i na optičkom putu instrumenta okularom. Porro prizma reflektira ulaznu svjetlost durbinskom optikom na senzor fotografije CMOS i izravno na okular za vizualno viziranje ako je potrebno. Proizvođač modula za fokusiranje garantira točnost mjerenja kutova od 1». Proces prilagodbe i kalibracije su ključni faktori za postizanje najviše kvalitete funkcionalnosti snimanja.

Prije dostupnosti IATS-a postojale su robotizirane totalne stanice koje su s implementiranim funkcijama automatskog praćenja reflektora u najužem smislu također IATS, jer se koriste za otkrivanje i viziranje ciljeva pomoću slikovnog senzora ili segmentiranih fotodioda. Međutim, ovi slikovni senzori nisu se mogli koristiti za dokumentaciju fotografija i fotogrametrijska mjerenja jer stručnjak nije imao pristup fotografijama i jer su slikovni senzori ili fotodiode detektirali samo svjetlo u spektru mjerenja signala. Danas je razlika

očigledna u načinu na koji stručnjak dobiva informacije iz integrirane kamere, tj. iz jedne fotografije (u jednom trenutku) ili iz videozapisa (niza fotografija). Također možemo razlikovati statičke ili kinematičke procese. S modernim digitalnim slikovnim senzorima oba zadatka mjerenja su moguća i nema potrebe za razlikovanjem instrumenata [8].

3.2. IATS sustav i kalibracija kamere

Upotreba odgovarajuće kalibrirane kamere od presudne je važnosti za praćenje pomaka. To omogućuje da se dvodimenzionalna koordinata fotografije prikaže u kutnim jedinicama, tj. kutu polja u prostoru objekta, koji se zatim može izraziti u linearnim jedinicama. Sve unutarnje i vanjske parametre treba znati za svaku snimljenu fotografiju što znači da su fotografije izravno georeferencirane. One se mogu koristiti za praćenje pomaka bez potrebe za kontrolnim točkama objekta ili dodatnim fotogrametrijskim procesima orijentacije. Metode fotogrametrijskog mjerenja fotografija, kako bi se detektirale signalizirani ciljevi i ciljevi koji nisu signalizirani, mogu se kombinirati s funkcijama totalne stanice za određivanje preciznih mjerenja kuta i udaljenosti [8].

U ovom odjeljku objašnjena je kalibracija kamere smještene u durbinu IATS-a, tj. u optičkom putu durбина. Fokus je na toj kameri, a ne na preglednoj kameri. Bolje je koristiti durbinsku kameru u svrhu praćenja pomaka, jer su potrebni vrlo točni podaci za određivanje dinamičkih pomaka s velikom brzinom i malim amplitudama. Vrlo točni podaci mogu se dobiti pomoću durbinske kamere, jer koristi durbinsku optiku i uvećanje. Međutim, također je potrebno provesti kalibraciju kamere, što uključuje određivanje unutarnjih parametara kamere. Presjek optičke osi s ravninom slikovnog senzora, tj. koordinate glavne točke fotografije, žarišna duljina u horizontalnom i vertikalnom smjeru, te proizvoljan broj koeficijenata za kompenzaciju radijalnih i tangencijalnih distorzija leća su unutarnji parametri koji se moraju odrediti tijekom kalibracije kamere [59].

Udaljenost između središta kamere i glavne točke je žarišna duljina kamere bez leća, a koje su integrirane u današnje IATS-ove. Dvije žarišne duljine (horizontalna i vertikalna) moraju biti određene, jer pikseli na slikovnom senzoru nisu kvadratni za neke kamere [60]. Nepravilna proizvodnja leća i pogreške u sastavljanju kamere rezultiraju radijalnim i tangencijalnim distorzijama leće linearnog modela za projiciranje točaka na ravninu fotografije u stvarnom svijetu [60].

Budući da praćenje podrazumijeva mjerenja između dviju ili više različitih serija ili epoha mjerenja točaka, konstantne koordinate glavne točke fotografije su ništavne i zbog toga ih nije potrebno unaprijed znati. Efekti distorzije pokazuju prostornu pravilnost tako da su susjedni pikseli slično pogođeni. Dakle, efekti distorzije su svedeni na neznatan nivo prilikom računanja razlika između objekata smještenih u sličnim regijama na slikovnom senzoru. Frekvencije uključene u vremenski niz, koje se mogu izračunati Fourierovom analizom ne ovise o fizičkoj jedinici vremenskog niza. To je zbog linearnog svojstva Fourierove transformacije (Jednadžba (1)) gdje se konstantni faktor c

može primijeniti prije ili nakon transformacije [59].

$$F\{c f(t)\} = cF\{f(t)\}. \quad (1)$$

Frekvencije vibracija građevinskih konstrukcija mogu se izračunati iz neobrađenih slikovnih koordinata, tj. iz slikovnih koordinata izmjerenih točaka. Stoga nije potrebna kalibracija kamere za tu svrhu. Kako bi se prikazali pomaci dobivene iz dviju epoha mjerenja u linearnim jedinicama (npr. m, dm, cm ili mm) potrebno je znati kutnu rezoluciju kamere. Pomaci na slici određuju se u pikselima i mogu se računati kao kutne veličine, a koje se zatim mogu prikazati u linearnim jedinicama kada se zna izmjerena udaljenost od instrumenta do promatranog objekta. Kutna rezolucija izražava veličinu jednog piksela senzora fotografije kao kutnu jedinicu. Prikazuje kut između dvaju objekata koji su prikazani na dva susjedna piksela. Za model kamere bez leća kutna rezolucija α povezana je s žarišnom duljinom f jednadžbom (2).

$$\tan(\alpha) = 1/f. \quad (2)$$

Da bi se pomaci precizno i točno odredili kutna rezolucija kamere također mora biti precizno i točno određena, budući da se pomaci objekta na slici izraženi u pikselima moraju pomnožiti s vrijednošću kutne rezolucije kako bi se prikazali u kutnim jedinicama, tj. u linearnim jedinicama. Pomaci objekta mogu biti i do nekoliko piksela, stoga mala nesigurnost u vrijednosti kutne rezolucije može dovesti do velike pogreške u izračunatom kutu [59].

Proizvođači podržavaju akademske istraživačke projekte koji obuhvaćaju različite metode kalibracije integriranih kamera. Na primjer, Walser je opisao kameru s afnim modelom čipa i razvio kombinirani pristup za uzimanje u obzir pogreške kalibracije kamere i instrumenta [11]. Vogel, s druge strane, proširio je jednadžbe kolinearnosti koristeći dodatne parametre kamere kako bi opisao odnos piksela i kuta u IATS [61]. Knobloch je izrazio centralnu projekciju s manje parametara kao afnu transformaciju bez pogrešaka teodolita pri upotrebi različitih položaja objektiva za fokusiranje [13]. Navedene metode uspoređivane su od strane Wasmeiera [14]. Sve metode temelje se na setu virtualnih kontrolnih točaka za prikupljanje podataka tijekom kalibracijskog postupka. U stvarnosti taj set se sastoji od samo jedne “stvarne” točke koja se mjeri više puta rotiranjem durbina s kamerom [8].

Kada se osigura odgovarajuća kalibracija, dobivene fotografije i videozapisi iz IATS-a su precizno georeferencirani u bilo kojem trenutku. Oni su posebno prikladni za strukturalni monitoring i geomonitoring, tj. za objekte i područja Zemljine površine koja su vrlo teško pristupačna. Također je moguće koristiti dodatnu vizualnu tehnologiju za niveliranje, čitanjem i analizom digitalno kodiranih uzoraka nivelmanske letve [62]. Glavna prednost IATS-a je činjenica da se metode i pristupi fotogrametrije mogu koristiti u kombinaciji s preciznim mjerenjima udaljenosti i kuta totalnom stanicom. Uz koordinate stajališta i orijentaciju instrumenta, svaka snimljena fotografija direktno je georeferencirana i može se koristiti za mjerenje pravaca bez potrebe za kontrolnim točkama

objekta ili dodatnim fotogrametrijskim postupcima orijentacije.

Univerzalni opis odnosa između homogenih 3D koordinata (Jednadžba (3)) i njihovih slikovnih projekcija (Jednadžba (4)) dan je od strane Wagnera [55].

Unutarnji parametar kamere K i vanjski parametri (matrica rotacije R i translacijski vektor T) time su kombinirani u jednu kompaktnu 3×4 projekcijsku matricu P (Jednadžba (5)).

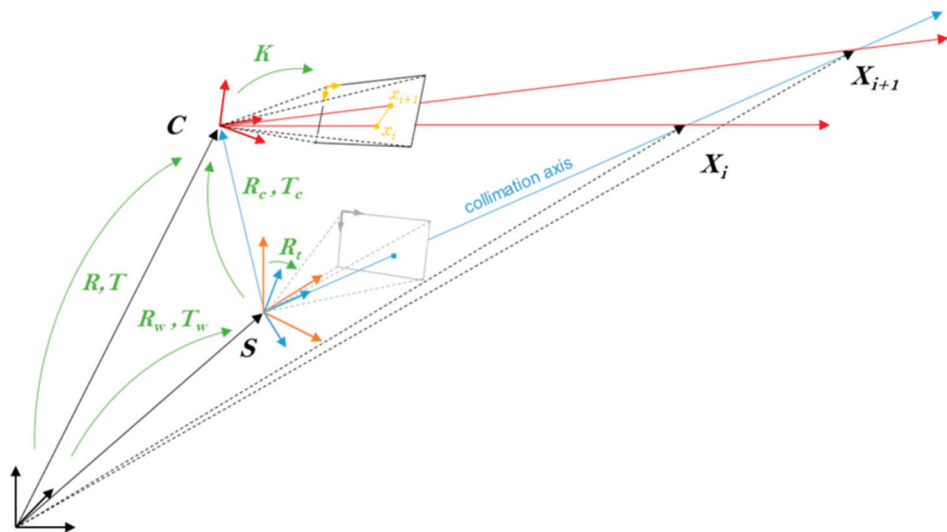
$$\tilde{X} = [X, Y, Z, 1]^T. \quad (3)$$

$$\tilde{x} = [x, y, 1]^T. \quad (4)$$

$$\tilde{x} = P\tilde{X} = K[R|T]\tilde{X}. \quad (5)$$

Unutarnji parametri R i T prikazani na Slici 10 sastoje se od tri različite euklidske transformacije [63]:

1. Transformacija iz svjetskog ili koordinatnog sustava objekta u koordinatni sustav teodolita (R_w, T_w);
2. Transformacija (čista rotacija) u koordinatni sustav durbina (R_t);
3. Transformacija u koordinatni sustav kamere (R_c, T_c).



Slika 10. Transformacije potrebne za pretvaranje slikovnih koordinata u kutove mjerene teodolitom i obratno [8].

3.3. Postupci mjerenja IATS-om i obrada podataka

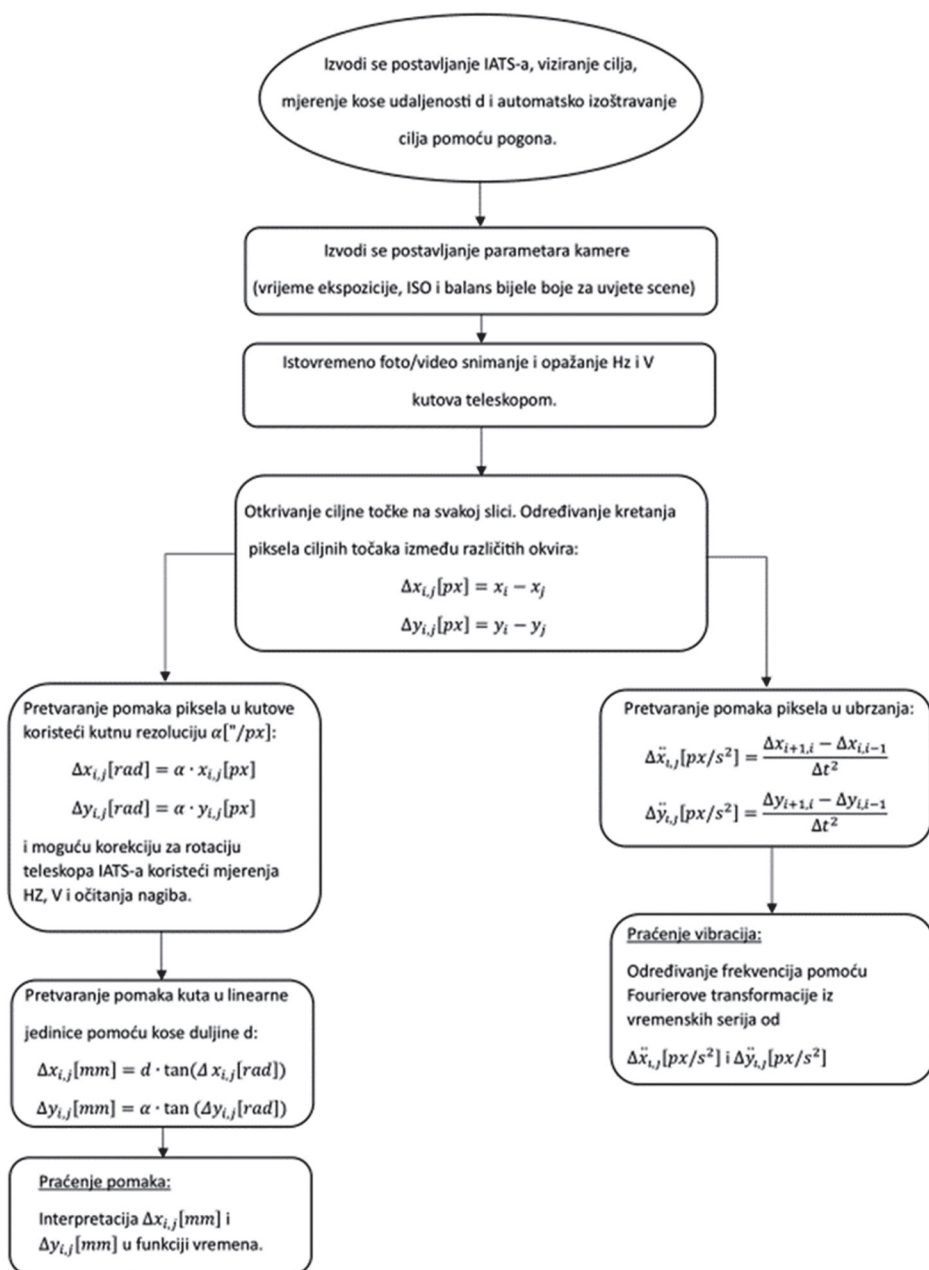
Mjerne procedure u eksperimentalnim ili uvjetima na terenu i radni tijek obrade podataka za provedbu praćenja pomaka i vibracija (tj. praćenje stanja kon-

strukcije) prikazani su na Slici 11. Radni tijek može biti potpuno automatski ili poluautomatski. Cijeli proces može se automatizirati pomoću Leica GeoCOM sučelja. Korisnička interakcija je potrebna samo na početku kako bi se inicijalno viziralo na ciljeve koji će biti praćeni i postavile postavke kamere [64].

Istovremeno se može pratiti nekoliko ciljnih točaka na različitim područjima građevinskih konstrukcija ili površini Zemlje pod uvjetom da su vidljive u vidnom polju kamere. IATS može snimiti video ili fotografiju ovisno o svrsi praćenja. Ako se obavlja strukturalno praćenje s ciljem utvrđivanja prirodnih frekvencija i dinamičkih pomaka struktura (npr. tijekom ispitivanja opterećenja ili svakodnevnog prometa), tada se snimaju videozapisi. Ako se obavlja geomonitoring površine Zemlje (npr. klizišta), tada se fotografije snimaju periodički. Stručnjak mora postaviti IATS, vizirati na cilj i postaviti parametre kamere. Za dugoročno praćenje gdje se ciljevi promatraju periodički stručnjak mora u prvoj epohi mjerenja vizirati na cilj, a u naknadnim epohama mjerenja registrirane položaje ciljeva iz prve epohe koristi se za automatsko viziranje.

Pomaci između ciljeva prikazani njihovim pikselima na fotografijama mogu se izračunati relativno prema prvom okviru/epohi ili između uzastopnih okvira/epoha. Ovo drugo nije prikladno za praćenje stanja konstrukcije snimanjem videozapisa, jer pomaci piksela u odnosu na prvi okvir moraju se izračunati zbrajanjem uzastopnih pomaka između svakog okvira što rezultira širenjem slučajnih pogrešaka u uzastopnim pomacima. Za praćenje vibracija, tj. određivanje prirodnih frekvencija strukture nije potrebna konverzija pomaka iz piksela u linearne jedinice. Kako bi se eliminirali trendovi u vremenskim serijama prije računanja frekvencija Fourierovom transformacijom iz pomaka piksela izračunavaju se ubrzanja. Upotreba uzastopnih pomaka piksela poželjna je kako bi se smanjio šum u dobivenom (ostvarenom) frekvencijskom spektru [59].

Moguće rotacije durbina IATS-a koje rezultiraju rotacijama kamere također se moraju uzeti u obzir prilikom visoko točnog praćenja pomaka. Ove male rotacije kamere mogu se dogoditi nenamjerno ili zbog nagiba cijele stanice. Oba učinka mjeri IATS, tj. očitavanja kuta i nagiba. Korekcija se postiže oduzimanjem rotacija kamere od kuta do cilja mjerenog na slici.



Slika 11. Radni tijek mjerenja IATS-a i obrade podataka za monitoring pomaka i vibracija (praćenje stanja konstrukcije) modificirano za ovu studiju iz [64].

Korištenjem predloženih mjerenja temeljenih na fotografijama moguće je detektirati pomicanje objekta koji stoji okomito na vizuru IATS-a. Za mjerenje pomaka duž vizurne osi može se koristiti IATS EDM. Ako su dostupni podaci IATS skenera alternativno se mogu koristiti, odnosno spajati laserski snimci i podaci kamere u RGB + D fotografije. Ovaj pristup kombinira prednosti oba načina. Udaljenost gustih laserskih skenova mijenja se kao funkcija vizure i može se lako detektirati. Suprotno tome, podaci s kamere najosjetljiviji su na pomake okomite na vizuru (tj. smjer promatranja durbina u koji je integrirana kamera). Na ovaj način pomaci se mogu odrediti izdvajanjem zajedničkih slikovnih karakteristika (RGB kanal) i praćenjem tijekom niza mjernih epoha. U kombinaciji s dubinskim kanalom (D) određene slikovne karakteristike (iz RGB + D) predstavljaju 3D koordinate koje se mogu koristiti za izračun 3D vektora pomaka [55].

Kod primjene monitoringa opisanih u ovom radu potrebno je samo kalibrirati kutnu rezoluciju kamere, a to se može postići brzim i jednostavnim pristupom bez dodatne mjerne opreme koristeći sposobnost totalne stanice da automatski rotira svoj durbin na precizno poznate položaje [59].

4. Primjena najsuvremenijih videoteodolita – IATS u monitoringu

Monitoring umjetnih ili prirodnih struktura, odnosno građevinskih konstrukcija ili dijelova zemljine površine, uključuje periodička ili kontinuirana promatranja radi procjene općeg trenutnog stanja objekta u pogledu uporabljivosti i stabilnosti, kao i određivanje potrebe za obnovom, rekonstrukcijom ili rušenjem struktura. Proces uključuje različite vrste mjerenja korištenjem različitih senzora. Mjerenja i rezultati moraju biti precizni i pouzdani, odnosno točni, te testiran njihov značaj [8]. Rezultati mjerenja predstavljaju važan parametar za procjenu stanja i sigurnosti struktura što je posebno važno za strukture koje se koriste izvan njihova dizajniranog vijeka trajanja. Bilo kakva oštećenja ili značajne deformacije utječu na sigurnost konstrukcija npr. mostova, brana, tornjeva ili nebodera što može rezultirati njihovim zatvaranjem ili čak urušavanjem. Pored izmjere i iskolčenja na gradilištu, monitoring umjetnih ili prirodnih struktura jedan je od ključnih zadataka u inženjerskoj geodeziji. Geodetski monitoring je jedan aspekt općenitih sustava monitoringa. Postoje dvije podvrste geodetskog monitoringa [8]:

- Strukturalni monitoring odnosi se na mjerenje i vrednovanje građevinskih konstrukcija poput mostova, tunela, brana, željeznica, tornjeva ili nebodera tj. općenito umjetno stvorenih objekata.
- Geomonitoring s druge strane koristi se kao pojam za određivanje promjena, kretanja ili deformacija prirodnih struktura, poput klizišta i padina.

Glavni cilj geodetskog monitoringa jest odrediti statistički značajne geometrijske promjene u veličini, obliku i položaju između dvije ili više mjernih epoha. Na temelju podataka iz praćenja moguće je poduzeti radnje na konstrukciji kako bi se spriječile materijalne i nematerijalne štete. Praćenje temeljeno na vibracijama, odnosno strukturalni monitoring postao je uobičajen. Sastoji se od određivanja dinamičkih pomaka i prirodnih frekvencija objekata iz različitih vremenskih epoha mjerenja. Svaka promjena u odnosu na dizajnirane frekven-

cije može biti znak oštećenja strukture i uzrok za uzbunu. Dinamički pomaci i prirodne frekvencije objekata mogu se odrediti pomoću robotizirane totalne stanice i GNSS instrumenata, iako njihova uporaba u tim projektima ima određena ograničenja. Ograničenje prvih modela RTS instrumenata bila je njihova frekvencija mjerenja instrumenta od 1 Hz, što je bilo manje od fundamentalne frekvencije mosta kako je prikazano u [65]. Mogućnosti novih modela RTS instrumenata s frekvencijama mjerenja od 5–7 Hz prikazane su u [66–70], gdje su RTS instrumenti korišteni za mjerenje simuliranih dinamičkih pomaka kako bi se analizirala točnost dinamičkih mjerenja pomoću RTS, te za određivanje dinamičkih pomaka i prirodnih frekvencija mostova u eksploataciji. Točnost RTS instrumenta s frekvencijama mjerenja od 20 Hz za snimanje promjenjivih 3D koordinata pokretnog cilja testirana je u [71], te za mjerenje dinamičkih pomaka i prirodnih frekvencija željezničkih mostova u [72], gdje je RTS odredio dinamičke pomake mosta u vertikalnom i lateralnom smjeru, kao i prvih pet prirodnih frekvencija mosta. Kako bi se prevladala ograničenja frekvencija mjerenja RTS-om, nova metoda prikazana je u [6], gdje su autori pokazali kako povećati frekvencije mjerenja RTS instrumentom s 7–10 Hz na 20 Hz. Nova metoda također je demonstrirana u terenskom eksperimentu na 74 metara dugom pješačkom mostu za mjerenje vertikalnih vibracija mosta.

Za razliku od RTS, GNSS instrumenti nemaju ograničenja u vezi s frekvencijama mjerenja, budući da noviji GNSS instrumenti imaju frekvenciju mjerenja do 100 Hz. GNSS instrumenti široko se koriste za praćenje dinamičkih pomaka velikih i fleksibilnih konstrukcija kao što su mostovi dugih raspona, tornjevi i visoke zgrade koje karakteriziraju veliki pomaci (10 cm ili više) i niže prirodne frekvencije (manje od 1 Hz). Rezultati GNSS praćenja dinamičkih pomaka velikih konstrukcija prikazani su u [66, 73–76], gdje su dinamički pomaci odnosno prirodne frekvencije konstrukcija uspješno određivane iz GNSS podataka. Određivanje dinamičkih pomaka krućih konstrukcija koje su karakterizirane manjim vrijednostima dinamičkih pomaka ograničeno je zbog ostvarive točnosti mjerenja koja je na razini centimetara. Trenutno su mnoga istraživanja usredotočena na primjenu GNSS instrumenata za praćenje dinamičkih pomaka krućih konstrukcija s dinamičkim pomacima u rasponu milimetara i višim frekvencijama oscilacija [67], kao i na poboljšanje točnosti mjerenja GNSS-a zbog ograničenja efemerida, multipatha i atmosferskih pogrešaka, te šuma u mjerenjima prijamnika [77].

Najčešće korišteni geodetski instrumenti za strukturalni monitoring i geomonitoring su niveliri, robotizirane totalne stanice i GNSS uređaji. Geodetski monitoring građevinskih konstrukcija obično se provodi pomoću GNSS-a u kombinaciji s RTS-om. GNSS pruža veliku pokrivenost, dok RTS nudi visoko precizna mjerenja. Implementacija geodetskih mjernih senzora, tj. instrumenata u složenim sustavima praćenja konstrukcija omogućava tzv. preventivno održavanje građevinskih struktura i prijelaz s reaktivnog održavanja, kada je šteta već nastala i moguće prouzročila ljudske žrtve, na preventivno održavanje. U posljednjih nekoliko godina postoji opći trend razvoja automatiziranog i autonomnog praćenja. Osim ekonomske isplativosti koja je uvijek bila “problem”, još jedan razlog za razvoj automatiziranog i autonomnog mjerenja je povećana potražnja za neprekidnim sustavima praćenja 24/7/365. Gusto izgrađene zgrade i složeni i zahtjevni građevinski projekti zahtijevaju

kontinuiranu kontrolu unaprijed definiranih granica pomaka. To uključuje i konstrukcije na opasnim mjestima koje nisu kontrolirane u prošlosti. Također, današnji gradovi se šire, a zbog nedostatka zemljišta grade se visoke zgrade, npr. Burj Khalifa i slični neboderi diljem svijeta.

Precizna 3D mjerenja točaka automatski se provode pomoću robotizirane totalne stanice i reflektora ili pomoću GNSS-a. Međutim, reflektore i GNSS nije uvijek moguće koristiti u svakoj situaciji, jer se ne mogu postaviti na svaku točku ili objekt interesa. Nadalje, u slučaju GNSS-a, potrebno je osigurati napajanje na ponekad opasnim i nedostupnim mjestima. Ovi problemi znače da moramo koristiti IATS sa slikovnim senzorima kako bismo prikupili prostorne, spektralne i radiometrijske informacije o ciljnoj točki interesa i njezinom okolišu, pri čemu se uz korištenje metoda analize fotografija, RTS i GNSS metode mogu zamijeniti za određivanje preciznih 3D mjerenja signaliziranih točaka i točaka koje nisu signalizirane [11].

S obzirom na starenje prometne infrastrukture gdje veliki broj mostova širom svijeta treba obnovu, ta činjenica predstavlja ogromnu priliku za geodetske senzore praćenja (RTS, GNSS), posebno IATS. Nažalost, gotovo svaka tri mjeseca svjedočimo urušavanju mostova diljem svijeta. Svaka vrsta oštećenja ili značajne deformacije utječu na sigurnost mostova, što može rezultirati njihovim zatvaranjem ili čak urušavanjem, čime se raspada prometni sustav [78]. U idućem odjeljku dajemo nekoliko primjera primjene IATS-a u svrhu strukturalnog monitoringa i geomonitoringa.

4.1. Primjene u strukturalnom monitoringu i geomonitoringu

Jednu od prvih primjena IATS-a za strukturalni monitoring provela je Katedra za Geodeziju (TU Munich) za mjerenje dinamičkih pomaka i prirodnih frekvencija mosta Fatih Sultan Mehmet iznad Bosporskog vodnog puta u Istanbulu u Turskoj. Koristeći vlastiti IATS prototip koji se sastojao od Leica TPS1201 robotizirane mjerne stanice s okularom zamijenjenim CMOS kamerom u boji od 5 MPx, uspjeli su odrediti vertikalna pomicanja do 50 cm i prvih šest prirodnih frekvencija mosta od 0.106 Hz, 0.132 Hz, 0.176 Hz, 0.209 Hz, 0.272 Hz i 0.333 Hz tijekom dnevnog prometa. Utvrđene frekvencije podudarale su se s poznatim frekvencijama iz prethodnih ispitivanja [7].

Istraživanje provedeno na Institutu za inženjersku geodeziju i mjerne sustave na Tehničkom sveučilištu u Grazu obuhvatilo je različite eksperimentalne studije i terenska mjerenja pomoću IATS Leica MS50 i MS60. Cilj im je bio odrediti prirodne frekvencije pješačkih mostova Augarten i Pongratz-Moore-Steg preko rijeke Mur u Grazu u Austriji. Za referentna mjerenja koristili su tri akcelerometra orijentirana u vertikalnom smjeru, poprijeko i uzduž mosta. Na mostu Augarten, koristeći Leica MS50 i instrumente povoljno postavljene duž uzdužne osi mosta [79] uspjeli su odrediti vertikalna pomicanja do 0.5 mm i frekvenciju mosta od 1.81 Hz pomoću IATS-a (1.81 Hz pomoću akcelerometra), što se poklopilo s prirodnom frekvencijom mosta od 1.8 Hz [80]. Na mostu Pongratz-Moore-Steg koristeći Leica MS60 i instrumente nepovoljno postavljene uzduž poprečne osi mosta [79] uspjeli su odrediti frekvenciju mosta od 2.5 Hz pomoću

IATS-a (2.5 Hz pomoću akcelerometra) što se poklapalo s frekvencijom koraka trkača preko mosta. Pomicanja uzduž osi mosta (uzdužna i poprečna) bila su premala da bi se razlučila pomoću IATS-a postavljenog u nepovoljan položaj i uglavnom su ovisila o točnosti mjerenja udaljenosti bez reflektora sa IATS [79].

Koncept geomonitoringa korištenjem dva IATS instrumenta za visokorezolucijsko dugometražno stereo snimanje georizničnih područja istraživano je u EU-FP7 projektu DEMONTES, a činjenice, ciljevi, rezultati i potpuni izvještaj mogu se pronaći u [81]. U radu [82] predstavljena je korištena metodologija i usporedba glavnih značajki s drugim terestričkim geodetskim metodama geomonitoringa. Teoretski ostvariva točnost mjernog sustava izvedena je i verificirana upotrebom terenskih podataka o udaljenim padinama glinokopa i simuliranim deformacijama. Deformacije su simulirane korištenjem pokreta umjetne stijene, strukturirane i teksturirane ploče dimenzija $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, koja je bila pričvršćena za dvije užadi i pomicana i rotirana pod različitim kutovima tijekom različitih epoha. Pokazano je da stereo koncept IATS-a može postići veću preciznost u određivanju 3D pomicanja, odnosno deformacija, u usporedbi s drugim sustavima s usporedivim senzorima. Upotrebom kamere durbina i uvećanja durbina, fotografije se mogu primjenjivati za duge domete. Gusti oblaci točaka s visokom točnošću pojedinačne točke uključujući informacije o njihovoj preciznosti su kreirani. 3D vektore pomaka moglo se izvesti automatski, te odrediti njihov značaj. Ovi rezultati mogu se koristiti za izravno određivanje krutih pokreta tijela objekata i površinskih mrlja. U usporedbi s mjerenjima terestričkog laserskog skenera (TLS) moguće je koristiti IATS pristup za velike udaljenosti s manjim otiscima, a nije potrebno postavljati referentne točke unutar područja interesa. Veliko uvećanje kamere durbina i mogućnost snimanja snopova fotografija dodatno dovode do veće gustoće točaka u usporedbi s jednostavnim fotogrametrijskim pristupima. Autori zaključuju da je ekstrapolirajući ostvarivu točnost na veće udaljenosti (koristeći fiksni omjer osnovne udaljenosti od 1:3 i druge ulazne parametre eksperimenta) bilo moguće ostvariti sljedeće Helmertove pogreške položaja: za 1 km, 0.035 m; za 2 km, 0.069 m; za 3 km, 0.103 m [82].

4.2. Studija slučaja

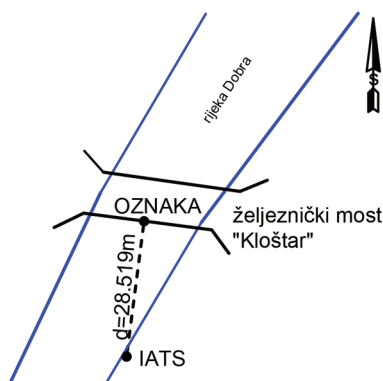
U ovom odjeljku predstavljen je vlastiti eksperiment kako bi se doprinijelo prethodno predstavljenim teorijskim temeljima, zajedno sa zaključcima o potencijalnim koristima i mogućnostima upotrebe IATS-a za strukturalni monitoring. Zbog nedostatka najsuvremenijeg IATS-a, kako je prikazano u odjeljku 2.5, razvijen je vlastiti IATS prototip koji se sastoji od Leica TPS1201 RTS i GoPro kamere montirane na okular durbina (Slika 12, lijevo). Projektiran je adapter izrađen pomoću 3D pisača za postavljanje GoPro kamere na Leica TPS1201. To je omogućilo direktno pričvršćivanje kamere na okular durbina Leica TPS1201. Prije provođenja mjerenja provedeno je ispitivanje stabilnosti durbina instrumenta u laboratoriju koristeći postavljenu kameru u vertikalnom smjeru. Ispitivanje je pokazalo da nema pomaka durbina. IATS prototip pružio je mogućnost upravljanja kamerom GoPro aplikacijom pametnim telefonom, dok se instrumentom moglo upravljati pomoću prijenosnog računala.

Na taj način nije se moralo dodirivati instrument ili kameru čime se osigurala njihova stabilnost duž horizontalne i vertikalne osi. Prije provedbe terenskih ispitivanja proveden je eksperiment u laboratoriju gdje je testirana sposobnost IATS prototipa da odredi unaprijed definirane amplitude pri različitim frekvencijama pomoću univerzalnog višenamjenskog uređaja namijenjenog statičkom i dinamičkom ispitivanju mehaničkih svojstava građevinskih materijala i konstrukcija. Ispitivanje je uključivalo simulirane amplitude od ± 0.2 , ± 0.5 , ± 1.0 , ± 2.0 i ± 5.0 mm na frekvencijama od 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 i 5.0 Hz. Određene su sve amplitude i frekvencije, kako je djelomično prikazano u [83].

Provedena ispitivanja na terenu izvedena su na željezničkom mostu Kloštar nakon njegove rekonstrukcije u svrhu ispitivanja opterećenja (Slika 12, sredina). Budući da most nije imao karakteristične točke, tj. ciljeve koji nisu signalizirani, a pogodni su za obradu fotografija i identifikaciju ciljeva između kadrova, korištene su unaprijed definirane foto-oznake (Slika 12, desno) za otkrivanje ciljeva između kadrova. Foto-oznake bile su četiri različita kruga s unaprijed definiranim promjerima (5 mm, 10 mm, 15 mm i 20 mm), kao i unaprijed definiranim horizontalnim razmakom između centara kruga od 40 mm i vertikalnim razmakom od 20 mm, kako je prikazano na Slici 12 (desno). IATS prototip bio je postavljen na udaljenosti 28.519 m po okomici na uzdužnu os mosta u sredini raspona mosta (Slika 13).



Slika 12. IATS prototip (lijevo), željeznički most Kloštar preko rijeke Dobre (sredina) i foto-oznaka (desno).

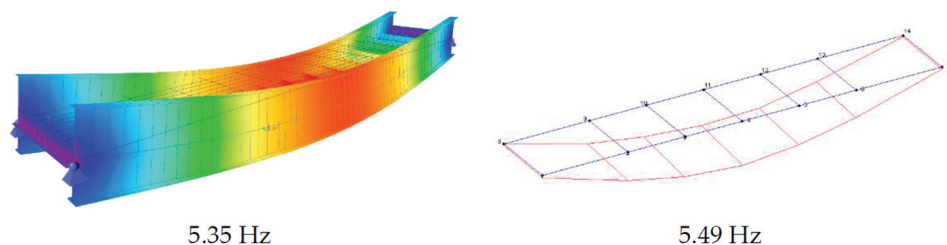


Slika 13. Postavljanje IATS prototipa na terenu u odnosu na most.

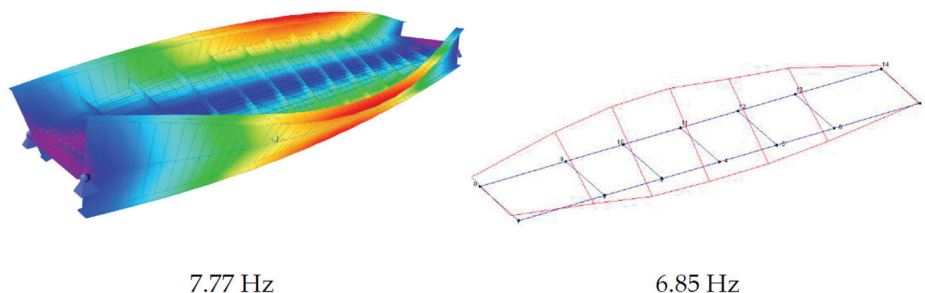
Na taj način postigli smo optimalan položaj IATS prototipa u odnosu na most za određivanje vertikalnih pomaka mosta, budući da je uzdužna os mosta bila paralelna sa slikovnim senzorom. Koristeći durbin instrumenta s $30\times$ uvećanjem, kamera je snimila film sa sljedećim postavkama: usko vidno polje, 1920×1080 px, na 60 sličica u sekundi. Pomoću ovog postava postigli smo najmanji krug s promjerom od 5 mm i 15 piksela, odnosno jedan piksel odgovarao je 0.333 mm za ovu studiju slučaja na terenu. Korišteni su i akcelometri za mjerenje frekvencijskog odziva mosta. Vlakovi su prolazili mostom različitim brzinama. U ovom radu prikazujemo rezultate iz dva testa odnosno kada su vlakovi prolazili brzinom od 40 km/h i 60 km/h.

Za obradu snimljenog filma s kamere razvijen je algoritam u MATLAB-u. Algoritam je izvršavao nekoliko koraka. Prvo je format filma pretvoren u kadrove pri čemu je svaka fotografija predstavljala jednu mjernu epohu. Zatim je fotografija pretvorena u ortogonalnu projekciju prema poznatom azimutu i zenitnom kutu IATS prototipa prema uzdužnoj osi mosta, odnosno prema položaju foto-oznake. Radi smanjenja vremena računanja definiran je prostor oko foto-oznake. Potom je izvršena konverzija s RGB fotografije u binarnu crno-bijelu fotografiju, olakšavajući otkrivanje granica krugova i centara krugova. Prema piksel koordinatama centara krugova izračunat je zajednički centar sva četiri kruga. Razlike između zajedničkih centara svake fotografije za svaki test u odnosu na prvu referentnu fotografiju prije prolaska vlaka mogle su se zatim izračunati. Prema tome moglo se izračunati dinamička vertikalna pomicanja u pikselima. Kao funkcija poznate udaljenosti između centara krugova izračunat je faktor mjerila i koristio se za pretvaranje piksel pomicanja u milimetarska pomicanja. Na kraju korištenjem brze Fourierove transformacije vremenska domena pretvorena je u frekvencijsku domenu, a određene su prirodne frekvencije mosta.

Slika 14 (lijevo) prikazuje izračunati prvi modalni oblik mosta na frekvenciji od 5.35 Hz, a Slika 15 (lijevo) prikazuje drugi modalni oblik na frekvenciji od 7.77 Hz pomoću metode konačnih elemenata (MKE). Na Slici 14 i 15 (desno) prikazani su prvi i drugi modalni oblik i frekvencije dobivene iz mjerenja ambijentalnih vibracija pomoću akcelometara. Razlike između MKE i mjerenja ambijentalnih vibracija događale su se redovito jer je MKE model napravljen pomoću projektantskih parametara koji su se mogli razlikovati od izgrađenog mosta.

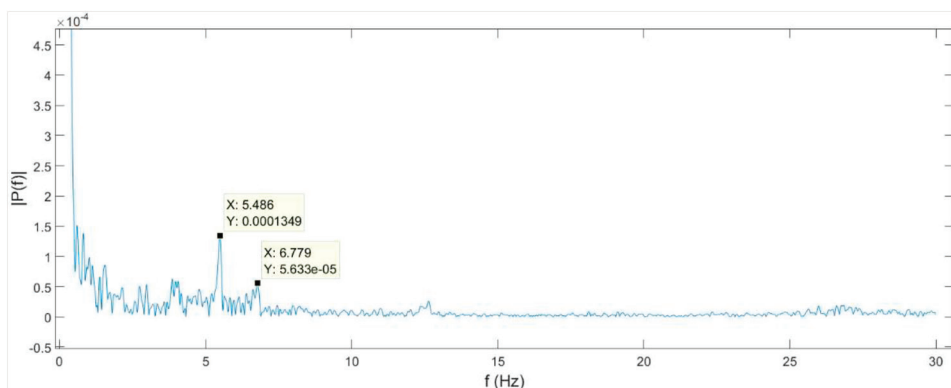


Slika 14. Prvi modalni oblik i frekvencija izračunati pomoću MKE (lijevo) i određeni akcelometrima (desno).

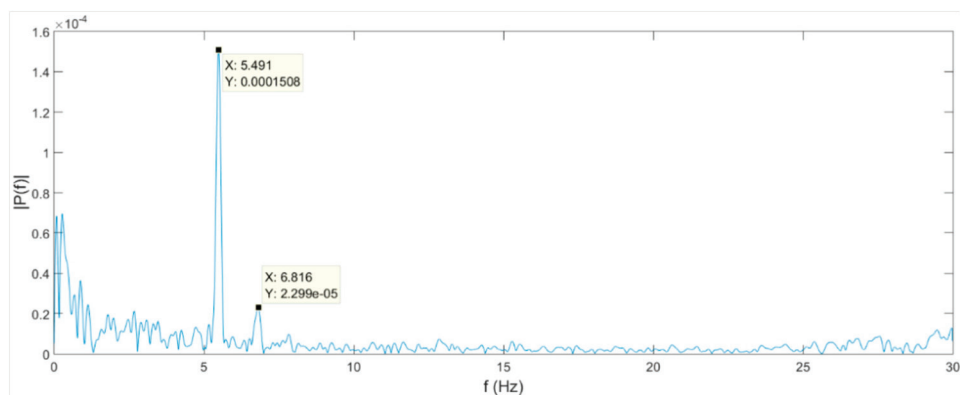


Slika 15. Drugi modalni oblik i frekvencija izračunati pomoću MKE (lijevo) i određeni akcelerometrima (desno).

Cilj ispitivanja bio je odrediti prirodne frekvencije mosta tijekom praćenja vibracija pomoću IATS prototipa. Kako bi se ocijenila točnost našeg IATS prototipa koristili smo mjerenja ambijentalnih vibracija akcelerometrom kao referentna. Prva prirodna frekvencija određena mjerenjima IATS prototipa podudarala se s prvom prirodnom frekvencijom mosta izmjerenom akcelerometrima, dok se druga prirodna frekvencija određena IATS-om malo razlikovala od one određene akcelerometrima za oba testa (Slike 16 i 17). Pri brzini od 40 km/h, prva frekvencija, $F1 = 5.49$ Hz, dobivena akcelerometrom, jednako je dobivena i IATS prototipom, $F1 = 5.49$ Hz. Pri brzini od 40 km/h, druga frekvencija, $F2 = 6.85$ Hz, dobivena akcelerometrom, dobivena je IATS prototipom kao $F2 = 6.78$ Hz. Pri brzini od 60 km/h, prva frekvencija, $F1 = 5.49$ Hz, dobivena akcelerometrom, jednako je dobivena i IATS prototipom, $F1 = 5.49$ Hz. Pri brzini od 60 km/h, druga frekvencija, $F2 = 6.85$ Hz, dobivena akcelerometrom, dobivena je IATS prototipom kao $F2 = 6.82$ Hz. Provedeno istraživanje pokazalo je da se IATS može koristiti za određivanje dominantnih vertikalnih prirodnih frekvencija potvrđujući prethodna istraživanja provedena od strane [7,79,80]. U budućem radu predstaviti će se sva provedena ispitivanja tijekom ovog ispitivanja opterećenja.



Slika 16. Amplitudski spektar vertikalne komponente i otkrivene prve i druge frekvencije pomoću IATS prototipa (poticanje prolazom vlaka brzinom od 40 km/h).



Slika 17. Amplitudski spektar vertikalne komponente i otkrivene prve i druge frekvencije pomoću IATS prototipa (poticanje prolazom vlaka brzinom od 60 km/h).

5. Rasprava

Provedeno istraživanje o tehničkom razvoju fototeodolita i video teodolita pokazalo je da je njihov razvoj bio spor i uglavnom ovisan o razvoju daljinomjera, slikovnih senzora, motorizacije i njihove integracije u teodolite. Na početku je teodolit podržavao fotoapararat u svrhu određivanja elemenata vanjske orijentacije. Ti tzv. foto-teodoliti koristili su se u mnogim kartografskim projektima jer je geodetsko snimanje bilo brže i jednostavnije, a istovremeno su nudili mogućnost snimanja većih područja s zadovoljavajućom točnošću.

Razvojem EDM-a i principa razlike u dvije struje u fotoelektričnim ćelijama, statički ciljevi mogli su se prepoznati i mjeriti s visokom točnošću. Razvijeni slikovni senzori zatim su integrirani u teodolite, mijenjajući njihovu svrhu iz kartiranja u praćenje objekata. Zahtjevi automobilske i zrakoplovne industrije u vezi s montažom i kontrolom kvalitete 1980-ih godina prisilili su tvrtke da izgrade elektroničke tahimetre s integriranim slikovnim sensorima u teodolitima sa servomotorima. Najveći doprinos ove linije razvoja bio je taj što su slikovni senzori korišteni za automatsko fokusiranje i određivanje položaja cilja u odnosu na optičku os durbina. Iako je tehnološki razvoj komercijalnih instrumenata usporio 1990-ih godina akademska zajednica održavala je napore u istraživanju i razvoju primjena digitalnih metoda obrade fotografija i računalnog vida, što se održava do danas. Početna istraživanja usmjerena su na otkrivanje umjetnih ciljeva i precizno viziranje pomoću kamera za viziranje i mjerenje ciljeva koji nisu signalizirani. Razvijene su opcije temeljene na umjetnoj inteligenciji. Implementacijom stručnog znanja o opažanju točaka u softverska rješenja i primjenom umjetne inteligencije razvijeni su ekspertni sustavi. Razvijeni algoritmi kasnije su implementirani u komercijalne instrumente. Automatizacijom mjerenja razina postignute točnosti je povećana.

Godina 2005. označila je uvođenje IATS-a kakvog danas poznajemo. Tehnološki razvoji vezani uz različite senzore, odnosno hardver i softver, omogućili su njihovu integraciju u instrumente. Nakon njihovog spajanja IATS se češće koriste

u zadacima strukturalnog monitoringa i geomonitoringa. Trenutno korišteni senzori za praćenje struktura i određivanje vibracija i dinamičkih pomaka struktura su akcelerometri, GNSS i RTS. Ti senzori imaju neke nedostatke, jer im je potrebno osigurati pristup nadziranoj strukturi i osigurati izvor napajanja. Korištenjem akcelerometra moguće je samo procijeniti vibracije struktura [64]. Nadalje, preciznost dinamičkih mjerenja GNSS instrumentom (u kinematičkom načinu mjerenja) na razini je centimetara s visokom frekvencijom uzorkovanja mjerenja (do 100 Hz); nasuprot tome, RTS može mjeriti pomicanje na razini milimetara, ali s nižom frekvencijom uzorkovanja mjerenja (5–20 Hz). Očito je da ove dvije tehnike mjerenja ne pružaju optimalno rješenje za strukturalni monitoring. Prema provedenim istraživačkim studijama prikazanim u odjeljku 4 jasno je da je IATS prevladao glavne nedostatke RTS i GNSS instrumenata u projektima strukturalnog monitoringa i geomonitoringa. Pristup nadziranoj strukturi nije potreban pri korištenju IATS-a, što omogućuje fleksibilniju definiciju točaka mjerenja. Osim toga postignuta točnost i preciznost također su na višoj razini u usporedbi s RTS-om i GNSS-om.

Kratki prikaz studija slučaja u članku pokazuje da se navedeni nedostaci akcelerometara, GNSS uređaja i robotizirane totalne stanice mogu prevladati korištenjem IATS-a (IATS prototip korišten je u našoj studiji slučaja). Razvijeni IATS prototip istaknuo je svoje glavne prednosti i potencijal u svrhu strukturalnog monitoringa u usporedbi s drugim sensorima. Preciznost i točnost mjerenih pomaka su na visokoj razini jer su mjerenja temeljena na fotografijama dobivenim GoPro kamerom sa 30× optičkim povećanjem TS Leica TPS1201. Korištenjem snimaka pri brzinama od 30 sličica u sekundi ili 60 sličica u sekundi bilo je moguće odrediti visoke prirodne frekvencije struktura. Prototip ne treba biti postavljen na strukturu, stoga pristup nadziranoj strukturi nije potreban. Osim prirodnih frekvencija možemo odrediti statičke i dinamičke pomake u vertikalnim i horizontalnim ravninama (uzdužno i poprečno ovisno o položaju prototipa u odnosu na strukturu). Potrebno je daljnje istraživanje u tom smjeru jer smo izveli samo studije za određivanje vertikalnih pomaka i prirodnih frekvencija, dok su studije o pomacima duž uzdužne ili poprečne osi planirane. Kako je prikazano u odjeljku 4, IATS najnovije generacije može obaviti sve ove zadatke. Međutim cijena prikazanog IATS prototipa puno je niža od cijene komercijalnog IATS-a što je također važan parametar za razmatranje.

Korištenjem predloženih mjerenja temeljenih na fotografijama moguće je detektirati pokrete objekta okomito na vizuru IATS-a. Za mjerenje pokreta duž vizurne osi može se koristiti IATS EDM. Ako je dostupno alternativno se mogu koristiti podaci IATS skenera, tj. spoj laserskih skenova i podataka kamere u RGB + D fotografije. Ovaj pristup kombinira prednosti ova dva načina. To je također moguće s najnovijim generacijama IATS-a, tj. IASTS-a, kako je objašnjeno u odjeljku 3.3. Trenutačno postoji nekoliko studija na tu temu. Međutim potrebno je daljnje istraživanje, jer su mogućnosti i prednosti koje ovaj pristup pruža za inženjerske zadatke u geomonitoringu opsežne posebno u opasnim i teško dostupnim područjima što zahtijeva temeljito testiranje i analizu.

Integracijom kamera u totalne stanice, tzv. IATS, ove različite klase senzora spojene su u jedan univerzalni instrument [5]. Ova integracija nudi širok raspon rješenja za različite geodetske zadatke koji se mogu riješiti mnogo brže, lakše i preciznije u usporedbi s klasičnim geodetskim metodama i instrumenti-

ma. Osim toga, nudi mogućnosti rješavanja nekih problema i obavljanja nekih zadataka koji su bili nemogući u prošlosti pomoću klasičnih TS, RTS i GNSS.

Literatura

1. Bannister, A.; Raymond, S.; Baker, R. *Surveying*, 6th ed.; Longman Scientific & Technical: London, UK, 1992; ISBN 0-470-21845-2.
2. Benčić, D.; Solarić, N. *Mjerni Instrumenti i Sustavi u Geodeziji i Geoinformatici*; Školska Knjiga: Zagreb, Croatia, 2008.
3. Ogundare, J.O. *Precise Surveying*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2016; ISBN 978-1-119-10251-9.
4. Lemmens, M. Total Stations: The Surveyor's Workhorse. *GIM Int.* 2016, 30, 20–25.
5. Wunderlich, T.; Wasmeier, P.; Wagner, A. Auf dem Weg zum geodätischen Universalinstrument—Wie nahe am Ziel sind IATS und MS50? In *Proceedings of the Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS 2014)*, Fulda, Germany, 11–12 December 2014; pp. 177–192.
6. Lienhart, W.; Ehrhart, M.; Grick, M. High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations. *J. Appl. Geod.* 2017, 11, 1–8. [CrossRef]
7. Wagner, A.; Wasmeier, P.; Reith, C.; Wunderlich, T. Bridge Monitoring by Means of Video-Tacheometer—A Case Study. *AVN Allg. Vermess. Nachr.* 2013, 120, 283–292.
8. Wagner, A. *New Geodetic Monitoring Approaches Using Image Assisted Total Stations*. Ph.D. Thesis, Technische Universität München, München, Germany, 2017.
9. Koppe, C. *Die Photogrammetrie Oder Bildmesskunst*; Verlag der Deutschen Photographen-Zeitung: Weimar, Germany, 1889.
10. Ott, M. *Photogrammetrischer Theodolit für Hochgebirgsaufnahmen: Nach Angabe von Professor Dr. S. Finsterwalder in München neu konstruiert*. *Z. Instrum.* 1895, 15, 370–373.
11. Walser, B.H. *Development and Calibration of an Image Assisted Total Station*. Ph.D. Thesis, ETH Zürich, Zürich, Switzerland, 2004.
12. Alexander, R.; Lehmann, M.; Kahmen, H.; Paar, G.; Miljanovic, M.; Ali, H.; Egly, U.; Eiter, T. A 3D optical deformation measurement system supported by knowledge-based and learning techniques. *J. Appl. Geod.* 2009, 3, 1–13. [CrossRef]
13. Knobloch, S. *Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines Kameraunterstützten Hängetachymeters*. Ph.D. Thesis, Technische Universität Dresden, Dresden, Germany, 2009.
14. Wasmeier, P. *Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten Bildgebender Tachymeter*. Ph.D. Thesis, Technische Universität München, München, Germany, 2009.

15. Reiterer, A.; Wagner, A. System Considerations of an Image Assisted Total Station—Evaluation and Assessment. *AVN Allg. Vermess.-Nachr.* 2012, 119, 83–94.
16. Huep, W. Scannen mit der trimble VX spatial station. *Z. Vermess.* 2010, 135, 330–336.
17. Gruner, H. Photogrammetry: 1776–1976. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1977, 43, 569–574.
18. Frankich, K. Close Range Photogrammetric Systems and Their Applications in Ophthalmology. Ph.D. Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 1973.
19. Finsterwalder, R.; Hofmann, W. *Photogrammetrie*, 3rd ed.; Walter de Gruyter & Co.: Berlin, Germany, 1968.
20. Leica Geosystems 200 Years of Surveying History. Available online: <https://leica-geosystems.com/about-us/summary/history> (accessed on 25 March 2021).
21. Gigas, E.; Ebeling, K. Elektrisches Auge. In *DGK; Institut für Angewandte Geodäsie: Frankfurt, Germany*, 1957; Volume B.
22. Wagner, A.; Wasmeier, P.; Wunderlich, T.; Ingensand, H. Vom selbstzielenden Theodolit zur Image Assisted Total Station From the Self-aiming Theodolite to Image Assisted Total Stations. *AVN Allg. Vermess. Nachr.* 2014, 121, 171–180.
23. C & D Professional Services Contraves EOTS Cinetheodolite. Available online: http://www.cdproservices.com/product_0903g.html (accessed on 25 March 2021).
24. Hilster, N. de 1980 SAT AGA-Minilir. Available online: http://www.dehilster.info/geodetic_instruments/1980_sat-sagem_AGAMinilir.php#note1 (accessed on 25 March 2021).
25. Wentzell, H.F. Polarfix: A new concept in high accuracy position fixing. *World Dredg. Mar. Constr.* 1983, 19, 9.
26. Ingensand, H. 2000 Jahre Theodolit: Von Heron bis Heinrich Wild. *Vermess. Photogramm. Kult.* 1992, 90, 128–140.
27. Kahmen, H.; Suhre, H. Ein lernfähiges tachymetrisches Vermessungssystem zur Überwachung kinematischer Vorgänge ohne Beobachter. *Z. Geodäsie Geoinf. Landmanag.* 1983, 108, 345–351.
28. Kahmen, H.; Steudel, J. Das automatisch zielende Messsystem GEOROBOT II. In *Proceedings of the Xth Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung*, München, Germany, 12–17 September 1988.
29. Gottwald, R. Kern E2-SE—Ein neues Instrument nicht nur für die Industrievermessung? *AVN Allg. Vermess. Nachr.* 1987, 147–153.
30. Katowski, O. Deformationsmessung an Bauwerken mit dem automatischen Theodolitmesssystem ATMS. In *Optical 3-D Measurement Techniques*; Wichmann: Karlsruhe, Germany, 1989; pp. 393–403.
31. Kennie, T.J.M.; Petrie, G. (Eds.) *Engineering Surveying Technology*; Taylor & Francis Group: London, UK; New York, NY, USA, 1990; Volume

- 27, ISBN 0751401935.
32. Lienhart, W. Integrated Digital Imaging and Its Impact on Survey Workflows; Visualisation Technical; PositionIT: Muldersdrift, South Africa, 2011; pp. 51–55.
33. Kahmen, H.; Roić, M. A new generation of measurement robots for object reconstruction without targeting. In Proceedings of the Optical 3d Measurements III, Vienna, Austria, 2–4 October 1995; pp. 251–262.
34. Fabiankowitsch, J. Automatische Richtungsmessung mit Digitalen Differenzbildern; TU Vienna: Vienna, Austria, 1990.
35. Mischke, A. Entwicklung Eines Videotheodolit-Meßsystems zur Automatischen Richtungsmessung von Nicht Signalisierten Objektpunkten; TU Vienna: Vienna, Austria, 2000; Volume 54.
36. Reiterer, A.; Vicovac, T.; Egly, U.; Mai, E.; Moafipoor, S.; Grejner-Brzezinska, D.A.; Toth, C.K. Application of artificial intelligence in Geodesy—A review of theoretical foundations and practical examples. *J. Appl. Geod.* 2010, 4, 201–217. [CrossRef]
37. Roić, M. Erfassung von Nicht Signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten. Ph.D. Thesis, Technische Universität Wien, Vienna, Austria, 1994.
38. Matthias, H. Der Roboter-Theodolit Topomat: Technik, Anwendungen und Auswirkungen auf den Beruf. *Vermess. Photogramm. Kult.* 1991, 8, 427–431. [CrossRef]
39. Topcon Topcon Museum|Total Station. Available online: <https://www.topcon.co.jp/en/positioning/museum/ts/> (accessed on 15 March 2021).
40. Ingensand, H.; Boeckem, B. Automatic Location and Pointing Techniques in Local Positioning Systems. In Proceedings of the 4th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Zürich, Switzerland, 29 September–2 October 1997; pp. 329–338.
41. Topcon GPT-7000i Specifications. Available online: <http://www.topcon.si/zares4/dokumenti/gpt-7000i.pdf> (accessed on 25 March 2021).
42. Topcon GPT-9000Ai Specifications. Available online: [https://totalstations.co/wp-content/uploads/2017/07/Topcon-GPT-9001 A-Edited-1.pdf](https://totalstations.co/wp-content/uploads/2017/07/Topcon-GPT-9001-A-Edited-1.pdf) (accessed on 11 March 2021).
43. Trimble Trimble VX Spatial Station. Available online: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-348124/022543-261F_TrimbleVX_DS_0110_lr.pdf (accessed on 25 March 2021).
44. Pentax R-400VDN Series. Available online: <https://pdf.archiexpo.com/pdf/pentax-precision/r-400vdn-series/151417-284341.html> (accessed on 25 March 2021).
45. Leica Geosystems, A. Leica Viva TS11 Datasheet. Available online: <https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/brochures/tender-flexline-plus/leica-viva-ts11-ds-lr.ashx?la=en&hash=8467ACC4E2E31C6DFF7C1497091D3692> (accessed on 25 March 2021).
46. Leica Geosystems, A. Leica Viva TS15 Datasheet. Available online: <http://>

- kumonos.info/downloads/datasheet_ts15.pdf (accessed on 25 March 2021).
47. Wagner, A.; Wiedemann, W.; Wasmeier, P.; Wunderlich, T. Improved concepts of using natural targets for geo-monitoring. In Proceedings of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Vienna, Austria, 30 March–1 April 2016.
 48. Wagner, A.; Wiedemann, W.; Wunderlich, T. Fusion of Laser Scan and Image Data for Deformation Monitoring—Concept and Perspective. In Proceedings of the INGEO—7th International Conference on Engineering Surveying, Lisbon, Portugal, 18–20 October 2017; pp. 157–164.
 49. Whitt, M. Trimble S Series Total Station Comparison—Positioning Solutions. Available online: <https://positioningsolutions.com/blogs/product-info/total-station-comparison> (accessed on 25 March 2021).
 50. Topcon DS-200i Series Imaging Robotic Total Station. Available online: https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product_files/ds-200i_series_broch_7010_2160_rev_c_sm.pdf (accessed on 25 March 2021).
 51. Maar, H.; Zogg, H.-M. Leica Nova MS60 White Paper. Available online: <http://leica-geosystems.com/products/total-stations/multistation/leica-nova-ms60> (accessed on 25 March 2021).
 52. Trimble Trimble SX10|Scanning Total Station. Available online: <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimblesx10> (accessed on 25 March 2021).
 53. Trimble Trimble SX12|Scanning Total Station. Available online: <https://geospatial.trimble.com/SX12> (accessed on 25 March 2021).
 54. Topcon Topcon GTL-1000 Laser Scanner Total Station. Available online: https://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/GTL-1000_E.pdf (accessed on 25 March 2021).
 55. Wagner, A. A new approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB + D images. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 2016, 82, 64–74. [CrossRef]
 56. Huep, W. Konzeption und Einsatzmöglichkeiten eines automatisierten Theodolitsystems. In Proceedings of the Xth Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München, Germany, 12–17 September 1988.
 57. Grimm, D.E.; Zogg, H.-M. Leica Nova MS50 White Paper. Available online: https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiVlMOpxKDvAhVmyoUKHeveD-IQFjAAegQIAhAD&url=https%3A%2F%2Fw3.leica-geosystems.com%2Fdownloads%2F%2Fz%2Ftps%2Fnova_ms50%2Fwhite-tech-paper%2Fleica_nova_ms50_tpa_en.pdf& (accessed on 25 March 2021).
 58. Grimm, D.; Kleemaier, G.; Zogg, H.-M. ATRplus White Paper. Available online: https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/white-papers/atrplus_wp.ashx?la=en&hash=91E09F6A1CF79DE10D9B742391F7B35F (accessed on 25 March 2021).
 59. Ehrhart, M.; Lienhart, W. Development and evaluation of a long range image-based monitoring system for civil engineering structures. In Proceedings of the SPIE 9437, Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2015, Aerospace, San Diego,

- CA, USA, 9–12 March 2015.
60. Hartley, R.; Zisserman, A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2004; ISBN 9780521540513.
 61. Vogel, M. *Vom Pixel zur Richtung Die Räumlichen Beziehungen Zwischen Abbildungsstrahlen und Tachymeter-Richtungen*. Ph.D. Thesis, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2006.
 62. Wagner, A.; Wiedemann, W.; Wunderlich, T. Using IATS to Read and Analyze Digital Leveling Staffs. In *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geodesy—SIG 2016*, Varaždin, Croatia, 20–22 May 2016; pp. 515–526.
 63. Wagner, A.; Wiedemann, W.; Wasmeier, P.; Wunderlich, T. Monitoring Concepts using Image Assisted Total Stations. In *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geodesy—SIG 2016*, Varaždin, Croatia, 20–22 May 2016; pp. 137–148.
 64. Ehrhart, M.; Lienhart, W. Monitoring of Civil Engineering Structures using a State-of-the-art Image Assisted Total Station. *J. Appl. Geod.* 2015, 9. [CrossRef]
 65. Cosser, E.; Roberts, G.W.; Meng, X.; Dodson, A. Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station. In *Proceedings of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Santorini, Greece, 25–28 May 2003; pp. 605–612.
 66. Lekidis, V.; Tsakiri, M.; Makra, K.; Karakostas, C.; Klimis, N.; Sous, I. Evaluation of dynamic response and local soil effects of the Evripos cable-stayed bridge using multi-sensor monitoring systems. *Eng. Geol.* 2005, 79, 43–59. [CrossRef]
 67. Psimoulis, P.; Moschas, F.; Stiros, S. Measuring the Displacements of a rigid footbridge using geodetic instruments and an accelerometer. In *Proceedings of the 1st Joint International Symposium on Deformation Monitoring*, Hong Kong, China, 2–4 November 2011.
 68. Gikas, V.; Daskalakis, S. Comparative testing and analysis of RTS vs. In GPS for structural monitoring using calibration measurements upon sinusoidal excitation. In *Proceedings of the 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis*, Lisbon, Portugal, 12–15 May 2008.
 69. Palazzo, D.R.; Friedmann, R.M.P.; Nadal, C.A.; Filho, M.L.S.; Veiga, L.A.K.; Faggion, P.L. Dynamic monitoring of structures using a robotic total station. In *Proceedings of the 23th International FIG Congress*, Munich, Germany, 8–13 October 2006.
 70. Gikas, V.; Daskalakis, S. Full scale validation of tracking total stations using a long stroke electrodynamic shaker. In *Proceedings of the 23th International FIG Congress*, Munich, Germany, 8–13 October 2006.
 71. Stempfhuber, W. Verification of the Trimble Universal Total Station (UTS) Performance for Kinematic Applications. In *Proceedings of the Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, Vienna, Austria, 1–3 July 2009.
 72. Marendić, A.; Paar, R.; Damjanović, D. Measurement of bridge dynamic displacements and natural frequencies by RTS. *Gradev. J. Croat. Assoc.*

- Civ. Eng. 2017, 69, 281–294. [CrossRef]
73. Roberts, G.W.; Meng, X.; Dodson, A.H. Integrating a Global Positioning System and Accelerometers to Monitor the Deflection of Bridges. *J. Surv. Eng.* 2004, 130, 65–72. [CrossRef]
 74. Yu, J.; Meng, X.; Shao, X.; Yan, B.; Yang, L. Identification of dynamic displacements and modal frequencies of a medium-span suspension bridge using multimode GNSS processing. *Eng. Struct.* 2014, 81, 432–443. [CrossRef]
 75. Meng, X.; Nguyen, D.; Xie, Y.; Owen, J.; Psimoulis, P.; Ince, S.; Chen, Q.; Ye, J.; Bhatia, P. Design and Implementation of a New System for Large Bridge Monitoring—GeoSHM. *Sensors* 2018, 18, 775. [CrossRef]
 76. Kaloop, M.; Elbeltagi, E.; Hu, J.; Elrefai, A. Recent Advances of Structures Monitoring and Evaluation Using GPS-Time Series Monitoring Systems: A Review. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2017, 6, 382. [CrossRef]
 77. Yu, J.; Meng, X.; Yan, B.; Xu, B.; Fan, Q.; Xie, Y. Global Navigation Satellite System-based positioning technology for structural health monitoring: A review. *Struct. Control Heal. Monit.* 2020, 27. [CrossRef]
 78. Paar, R. Geospatial Data Bases of Objects in the Highway Management System of the Republic of Croatia. Ph.D. Thesis, University of Zagreb, Zagreb, Croatia, 2010.
 79. Ehrhart, M.; Lienhart, W.; Kalenjuk, S. Monitoring of Bridge vibrations with image-assisted total stations. In *Proceedings of the 4th Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of civil Structures (SMAR)*, Zurich, Switzerland, 13–15 September 2017.
 80. Ehrhart, M.; Lienhart, W. Image-based dynamic deformation monitoring of civil engineering structures from long ranges. In *Proceedings of the SPIE 9405, Image Processing: Machine Vision Applications VIII*, San Francisco, CA, USA, 10–11 February 2015.
 81. Paar, G. Deformation Monitoring by High Resolution Terrestrial Long Range Sensing. 2014. Available online: <https://cordis.europa.eu/project/id/285839> (accessed on 25 March 2021).
 82. Wagner, A.; Huber, B.; Wiedemann, W.; Paar, G. Long-Range Geo-Monitoring Using Image Assisted Total Stations. *J. Appl. Geod.* 2014, 8. [CrossRef]
 83. Paar, R.; Marendić, A.; Wagner, A.; Wiedemann, W.; Wunderlich, T.; Roić, M.; Damjanović, D. Using IATS and digital levelling staffs for the determination of dynamic displacements and natural oscillation frequencies of civil engineering structures. In *Proceedings of the INGEO 2017—7th International Conference on Engineering Surveying*, Lisbon, Portugal, 18–20 October 2017.