

UDK 528.486:65.011.56
Originalni znanstveni članak

RAČUNARSKI POTPOMOGNUTI POSTUPCI MJERENJA I MJERNI ROBOTI ZA ISKOLČAVANJE I KONTROLU GRAĐEVINSKIH OBJEKATA U MOSTOGRADNJI I VISOKOGRADNJI

Heribert KAHMEN — Beč*

SAŽETAK: Opisani su suvremeni geodetski mjerni sustavi, koji se primjenjuju pri iskolčavanju i kontroli velikih građevinskih objekata, a zasnivaju se na računarski potpomognutim postupcima mjerenja i mjernim robotima. Praktična primjena opisanog mjernog sustava dana je na primjeru gradnje rashladnog tornja atomske elektrane realizirane u južnoj Africi.

1. UVOD

Praktični i znanstveni postupci na različitim područjima graditeljstva — npr. statike i mehanike tla — omogućavaju optimalnije iskorištavanje i dodatna opterećenja materijala, a time i izgradnju smjelih i velikih objekata. S tim u vezi od posebnog je značenja definicija sigurnosnih kriterija tih objekata kao i dokaznice nosivosti i uporabljivosti objekta.

Mjerni sustavi koji omogućavaju visokotočnu realizaciju geometrije građevinskih objekata i s velikim senzibilitetom kontroliraju promjene njenih oblika dobili su posebno značenje. Kako su te metode mjerenja povezane s velikim utroškom vremena, jer je u pravilu nužno prikupiti i obraditi veliku količinu podataka, mjerni postupci moraju biti u visokom stupnju automatizirani. Takve zahtjeve ispunjavaju računarsko potpomognute metode mjerenja i mjerni roboti.

Za *iskolčavanje i kontrolu*, a iz razloga ekonomičnosti, oblik građevinskog objekta mora se apstrahirati pomoću određenog broja točaka. Količina odabranih točaka i njihov međusobni razmak mora biti takav da oblik objekta i primjenom interpolacijskih metoda ostane nepromijenjen. Danas se u pravilu u sklopu projektne dokumentacije nalaze i tablični prikazi trodimenzionalnih koordinata točaka objekta. One su dane ili u koordinatnom sustavu objekta (koordinatni sustav specijalnog objekta) i/ili u koordinatnom sustavu gradilišta.

* Prof. dr. Heribert Kahmen, TU-Wien Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Wien, Gusshausstrasse 27—29.

S njemačkog prevela Branka Capek, dipl. inž.

Koordinate točaka objekta i njihovi međusobni pomaci određuju se mjerenjem duljina, smjerova ili njihovim promjenama. Za određivanje tih veličina stoje danas na raspolaganju visokotočne metode mjerenja. O načinima njihove primjene, upravljanja i o mogućnostima njihove automatizacije, kao i uključivanju u procese produkcije, podrobnije se govori u nastavku teksta.

2. INSTRUMENTI ZA ISKOLČAVANJE I KONTROLU OBJEKTA

Mjerni instrumenti, posebno u visokogradnji i mostogradnji, moraju često ispunjavati visoko postavljene zahtjeve s obzirom na automatizaciju, kvalitetu i osiguravanje kvalitete mjernog procesa. Osim toga, često moraju imati i takva svojstva da se na osnovi mjerenih i kasnije obrađenih veličina može izravno upravljački djelovati na proces izgradnje objekta. Takve zahtjeve ispunjavaju mjerni sustavi s električnim sensorima, pomoću kojih se geometrijske ili mehaničke veličine transformiraju u električne, a one se zatim pomoću računala obrađuju u realnom vremenu, a u svrhu upravljanja procesom gradnje.

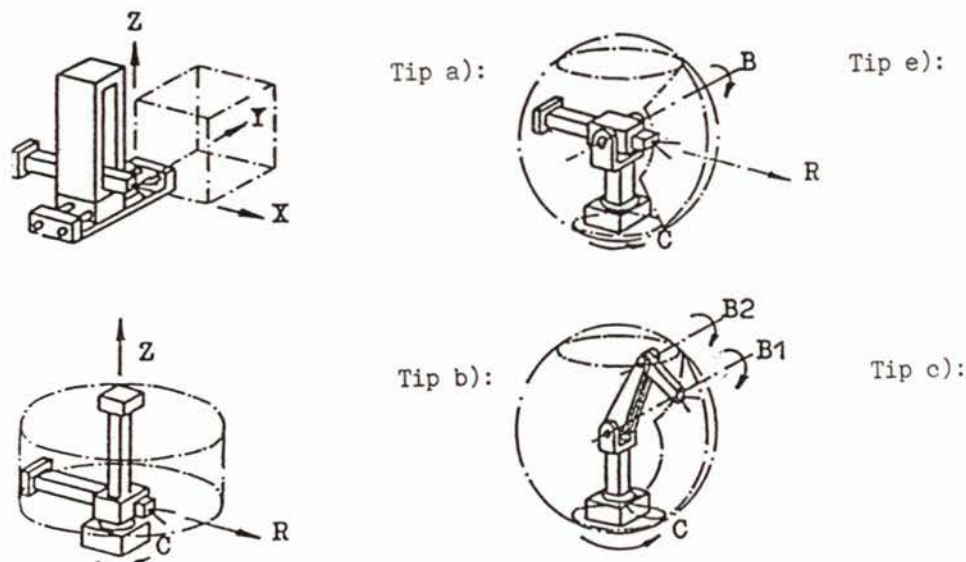
Klasični geodetski mjerni instrumenti su taj razvoj umnogome povukli za sobom. Danas za mjerenje horizontalnih i vertikalnih kutova raspolažemo elektroničkim teodolitima svih klasa točnosti. Elektronički teodoliti mogu se kombinirati s elektroničkim daljinomjerima na način da ta dva sustava budu međusobno koaksijalna. Takav spoj teodolita s daljinomjerom omogućava mjerenje svih triju komponenti prostornih vektora, memoriranje mjerenih podataka i njihovu računarsku obradu. Detaljan opis takvog vektorskog mjernog sustava (elektronički tahimetar) nalazimo npr. u Kahmena (1986).

Uvođenjem senzora učinjen je tek prvi korak u automatizaciji zadataka vezanih za iskolčavanje i kontrolu građevinskih objekata. I kod elektroničkih se teodolita, kao i kod klasičnih, pomicanje osi izvodi manuelno. Međutim, zahtjevi za povećanjem ekonomičnosti mjernog procesa, a to znači za skraćivanjem vremena opažanja i smanjivanjem broja opažanja, traži dodatne automatizirane komponente. Rješenje je pronađeno: treba slijediti ideje robotike. Prema definiciji, robot je specijalna vrsta stroja koja:

- može preuzeti aktivnosti koje inače izvodi čovjek,
- posjeduje jednu ili više translacijskih i/ili rotacijskih osovina,
- dodatno je višestruko opremljen sensorima (npr. za umjetni vid, opip, ...),
- u stanju je memorirati niz postupaka, te ih kasnije bez intervencije čovjeka ponoviti,
- u slučaju da posjeduje sposobnost učenja, može, a na ranije stečenim iskustvima, gore navedene postupke mijenjati.

Svaki tip robota može u ovisnosti o kinematičkoj građi osovina svladati određen, njemu namijenjen radni prostor.

Na slici 1. prikazani su različiti tipovi robota. Ovisno o konstrukciji robota, osovine izvode translacijska ili rotacijska kretanja, pri čemu razlikujemo npr. konstrukciju koja se zasniva na kartezijskom koordinatnom sustavu (tip a), cilindričnom (tip b), sferom (tip c) i sfernom na osnovi



Slika 1. Različiti tipovi robota

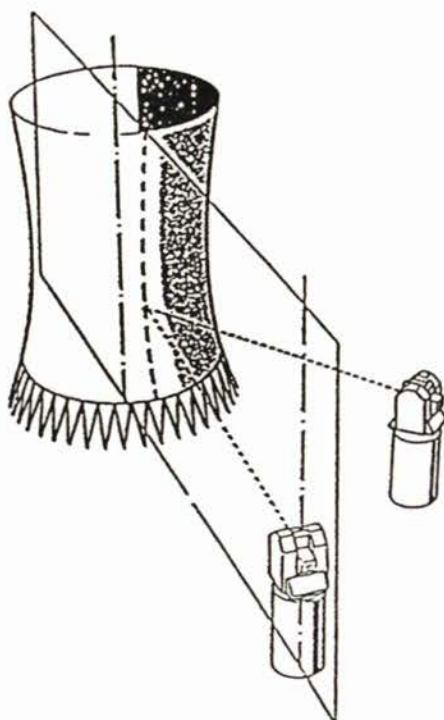
zglobnog kraka (tip d). Osovine se pokreću pneumatski, hidraulično i električno.

Mjerni roboti izvode umjesto čovjeka prostorni promjer Zemljine gornje površine, kao i objekata koji se nalaze na njoj, bilo da su u nepomičnom ili pomičnom stanju. Za takav promjer posebno se pogodnim pokazao robot građen na principu sfernih koordinata (tip c). Osnovni element robota je elektronički teodolit, čija se horizontalna i vertikalna os pokreće pomoću impulsnog stroja. Translacijska os određena je optikom durbina i/ili daljinomjera tako da se u odnosu na koordinatni sustav mogu odrediti pravci i/ili iznosi vektora do točaka objekta. Iz izloženog proizlazi da se u odnosu na sferni koordinatni sustav može prostorno obuhvatiti cijeli objekt.

Mjerni robot koji je raspolagao računarsko potpomognutim automatskim viziranjem i pokretanjem osovina pomoću impulsnog motora prvi je put integriran u jedan industrijski proces 1983. godine. Takav sustav poznat je pod imenom GEO-ROBOT i omogućava, pomoću vektora mjerenih u realnom vremenu, kontrolu objekata velikih površina prostiranja (i do nekoliko kilometara) (vidi Kahmen i dr. 1983 i 1986). Točke na objektu — na koje se vizira — označene su reflektorima. Upravljačko računalo raspolaže približnim koordinatama tih točaka i može približno usmjeriti optičke osi mjernog sustava na točke objekta. Nakon toga, centriranjem reflektiranog signala daljinomjera, slijedi točno viziranje. Centriranje signala zasniva se na mjerenju intenziteta zrake. Ova se metoda pokazala dosta grubom za kontrolu objekata velikih površina protezanja. Posebnu varijantu ove metode čini primjena daljinomjera, kojim se bez specijalnih reflektora mogu mjeriti duljine do točaka objekta. Ako upravljačkom računalu damo koordinate točaka objekta definirane u projektnoj dokumentaciji, računalo može izra-

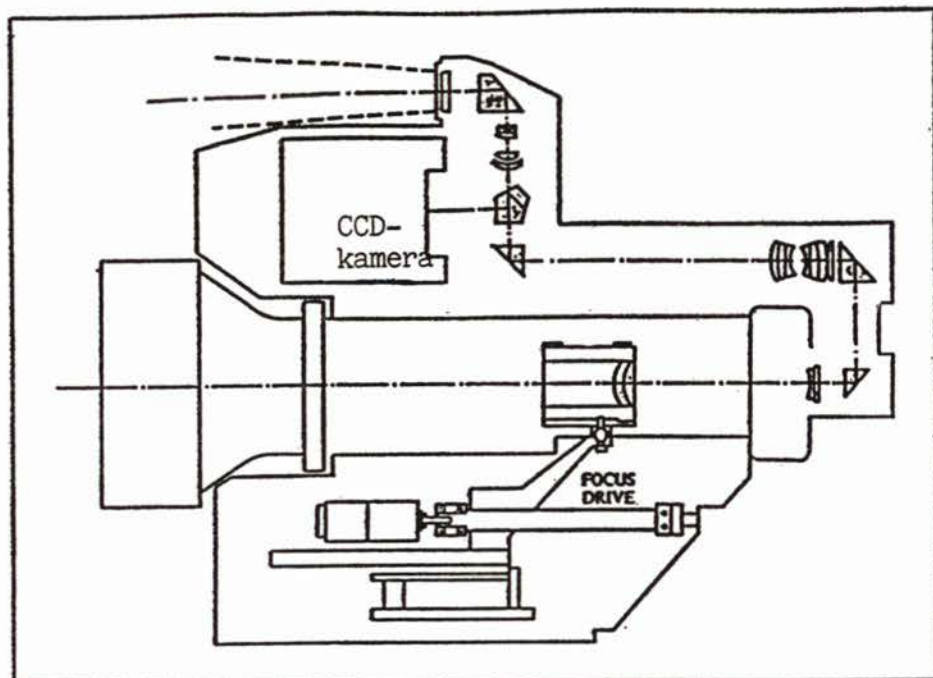
čunati upravljačke podatke pomoću kojih se optičke osi teodolita i daljinomjera, preko impulsnog motora, usmjeravaju prema tim točkama. Slijedi određivanje vektora do naviziranih točaka. Prednost ove metode sastoji se u tome da se točke na objektu ne moraju označiti, što predstavlja veliku uštedu u vremenu, pogotovo kada su u pitanju visoki objekti (npr. rashladni tornjevi, silosi, brane). Istina, u takvim slučajevima površine objekata moraju imati svojstvo da reflektiraju zrake. Za te svrhe beton je posebno pogodan.

Kod nekih problema koji se javljaju pri izmjeri industrijskih objekata — posebno onih gdje se traži visoka točnost izvedbe — povoljnije bi bilo oblik objekta i njegove promjene određivati mjerenjem horizontalnih i vertikalnih kutova s različitih stajališta instrumenata. U tom slučaju pozicije i orijentacije instrumenata moraju biti precizno dane u referentnom koordinatnom sustavu. Takvi mjerni sustavi sastoje se od dva ili više teodolita, odnosno mjernih robota (slika 2). Kod najjednostavnijeg stupanja automa-



Slika 2. Sistemi teodolita (Kartowski 1989)

tizacije pokretanje osi teodolita i viziranje izvodi opažatelj manualno. Cijeli mjerni proces može se potpuno automatizirati ako pokretanje osi i fokusiranje durbin teodolita preuzme na sebe računarski upravljani impulsni stroj i ako se u durbin teodolita integrira CCD-kamera (slika 3); kamera služi za optoelektroničko snimanje navizirane točke, a u svrhu raspoznavanja cilja, odnosno obrade slike (slika 3).

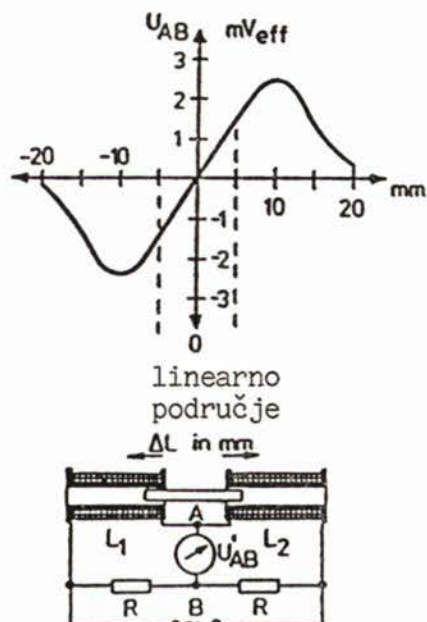


Slika 3. Durbin i integrirana kamera videoteodolita
(Heup i dr. 1988)

Ovaj motorno upravljani videoteodolit osnova je mjernog robota. Mjerne markice pričvršćene na objekt (čije su konstruktivne koordinate već ranije memorirane u memoriji računala) mogu se sada brzo, za nekoliko sekundi po točki, izmjeriti i izračunati (Gottwald 1987, Heup i dr. 1988). Za kontrolu građevinskih objekata pokazalo se povoljnim da se markice ne lijepe mehanički na površinu objekta, već pomoću tzv. »pointerteodolita« točke na koje treba vizirati, a koje su poznate po koordinatama, projiciraju na površinu objekta (Kratowski 1989). Ciljne markice mogu biti raspoređene uzduž profila ili u obliku rasterske mreže. Kada računarski potpomognut »pointerteodolit« opaža točke uzduž profila ili rastera, automatski ga slijedi i videoteodolit.

Kao rezultat mjerenja dobiva se snop pravaca, koji čine prostornu mrežu. Orijentacija i mjerilo mreže određuje se pomoću orijentacijskih točaka (točke poznate po koordinatama), koje se također moraju signalizirati i navizirati. Koordinate objekta dobivamo prostornim izjednačenjem mreže po metodi najmanjih kvadrata. Pored klasičnih geodetskih mjernih sustava stoji nam danas na raspolaganju cijeli niz *instrumenata*, kojima se mogu mjeriti *male promjene duljina, visina i nagiba*, kao i *brzina i ubrzanje*. Ti se instrumenti pričvršćuju izravno na površinu objekta koji se opaža. U nastavku se daje kratak opis tih instrumenata.

Male promjene duljina mogu se mjeriti ekstenzometrima. Oni se npr. sastoje od diferencijalnog navoja i jedne aksijalno vođene uvlačne jezgre,



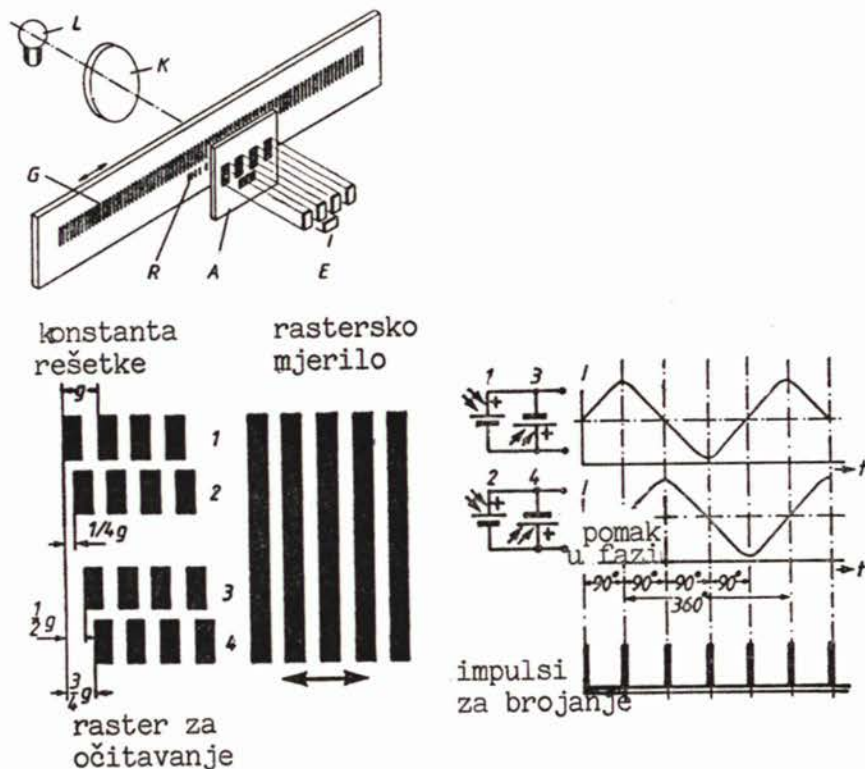
Slika 4. Ekstenzometar s diferencijalnim navojem
(Kahmen 1978)

što su komponente Wheatsonova električnog mosta izmjenične struje (slika 4). Uvlačna jezgra se može povezati s točkom objekta, a diferencijalni navoj s referentnom točkom. Pomiče li se točka objekta relativno u odnosu na referentnu točku, promjene duljina u dijagonali mosta iskazuju se kao promjene napona. Promjene napona digitaliziraju se pomoću digitalnog voltmetra, podaci se šalju dalje do računala, gdje se na osnovi karakteristične krivulje preračunavaju u promjene duljina, te se dalje obrađuju u svrhu analize deformacija.

Postoji puno varijanti takvih pokazivača duljina. Tako se npr. može diferencijalni navoj zamijeniti diferencijalnim kondenzatorom ili mjerni most diferencijalnim transformatorom. Zajedničko svojstvo svih tih instrumenata jest visoka točnost. Njihova točnost ovisi o području mjerenja. Kod malih područja mogu se dostići i vrijednosti reda veličine 1/1000 mm. Negativna je strana tih instrumenata da se geometrijske veličine prvo transformiraju u analogne električne, a tek se na kraju digitaliziraju. Promjenom temperature električni elementi (otpornici, navoji, ...) mijenjaju njihove parametre, te se može desiti da uslijed temperaturnog pomaka dođe i do promjene karakteristične krivulje, koja se može očitovati kao pomak nulte točke.

Te negativnosti nestaju ako se analogno-digitalne promjene izvedu optičkomehanički s inkrementalnim mjerilima, kod kojih kao mjerilo služi veoma točno izveden reflektorni ili transmisijski raster. Za grubo očitavanje odobravaju se rasterske crte koje promiču ispred svjetlosnog zavora. Njihov je razmak (konstanta rešetke — rastera) poznat i može se označiti kao os-

novna moć razlučivanja. Osim toga, mjerni sustav mora raspolagati i elementom koji može razaznati smjer kretanja rešetke, da bi ovisno o smjeru kretanja impulse pribrojivao ili suptrahirao. Sustav ne smije biti osjetljiv na mehaničke smetnje — vibracije. To je postignuto na taj način da je svjetlosni zaslon tako konstruiran da prilikom očitavanja nastaju dva, za 90° pomaknuta sinusoidna signala (slika 5). Ta dva signala omogućavaju do-

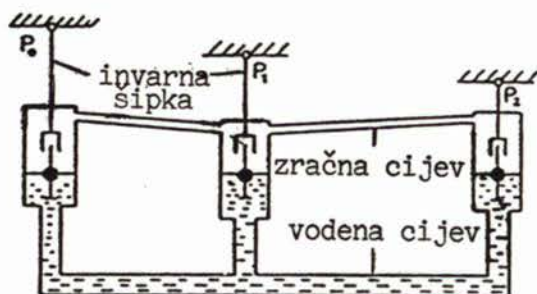


Slika 5. Mjerenje duljina inkrementalnim mjerilom L: žarulja, K: kondenzator, G: rastersko mjerilo, R: referentna markica kao apsolutna nula, A: ploča za analizu, E: fotoelement (Neumann, Schröder 1983)

datno povećanje točnosti, jer se sada mogu na mjestu nultog prolaza kroz elektronske elemente u jednom signalnom periodu proizvesti četiri impulsa. Moć razlučivanja pomaka (promjene duljine) odgovara tada $1/4$ konstante rešetke. Time su omogućene točnosti u području $1/1000$ mm.

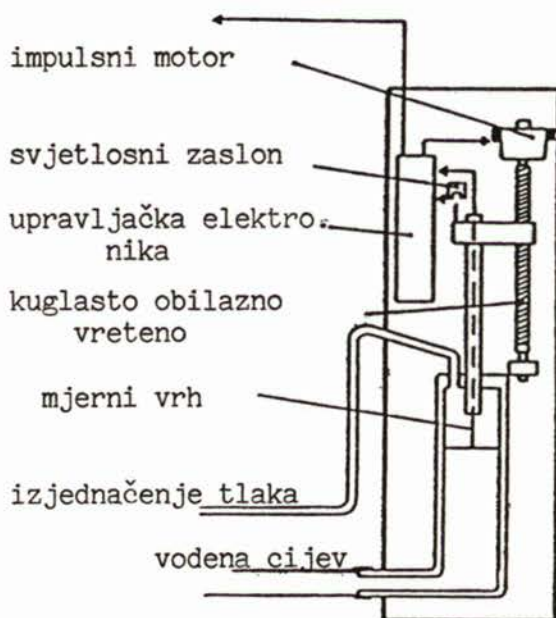
Promjene visina mogu se mjeriti i hidrostatskim nivelmanom. Osnovni princip hidrostatskog nivelmana prikazan je na slici 6.

Opazaju se relativne visine točaka P_0, P_1, \dots , u odnosu na razinu vode. U tu svrhu točke se pomoću invarnih šipki ili sličnih uređaja postavljaju na približno iste visine. Visinske razlike između točaka i razine vode možemo mjeriti na više načina. Na slici 6 prikazan je način mjerenja pomoću indukcijskog ekstenzometra. Za analogno-digitalne transformacije povoljnije je



Slika 6. Osnovni princip hidrostatskog nivelmana

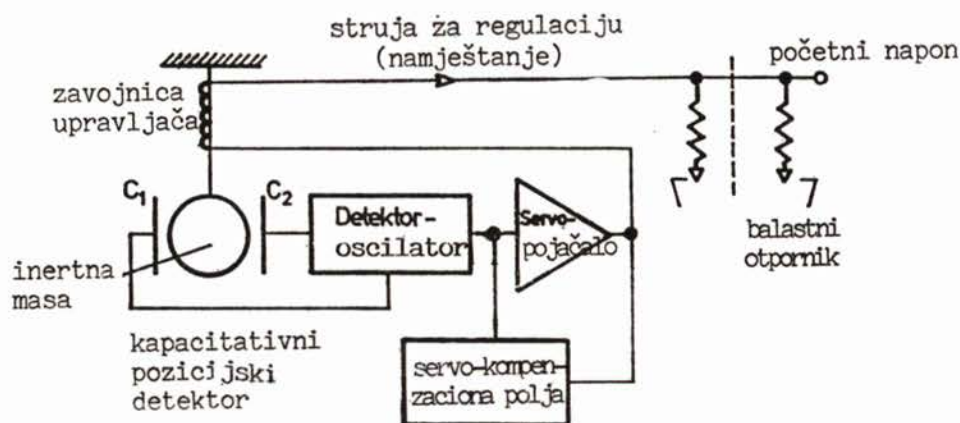
optičkomehaničko rješenje jer je manje osjetljivo na temperaturne promjene (slika 7).



Slika 7. Princip hidrostatskog sustava ELWAAG (Thierbach 1982)

Mjerni put se određuje pomoću mjerne igle, koju pokreće kuglasto obilazno vreteno. Put igle ograničen je s gornje strane prekidačem, a s donje kontaktom s površinom vode. Duljina puta iznosi do 100 mm. Impulsni motor pokreće kuglasto vreteno. Impulsi motora služe neposredno kao mjerni signal, pri čemu jedan impuls (kod 100 koraka/obrta i visini hoda od 1 mm) pokrene vrh mjerne igle za 1/100 mm. Upravljačka elektronika osigurava automatizaciju mjernog procesa. Na startni signal mjerna igla se pomoću impulsnog motora dovede do prekidača u početni položaj.

Posebno su interesantni senzori koji kvazi »preklapanjem« mogu poslužiti kao estenzometri, mjerači nagiba i mjerači brzina (slika 8). Kod tih



Slika 8. Libela Q — Fkex

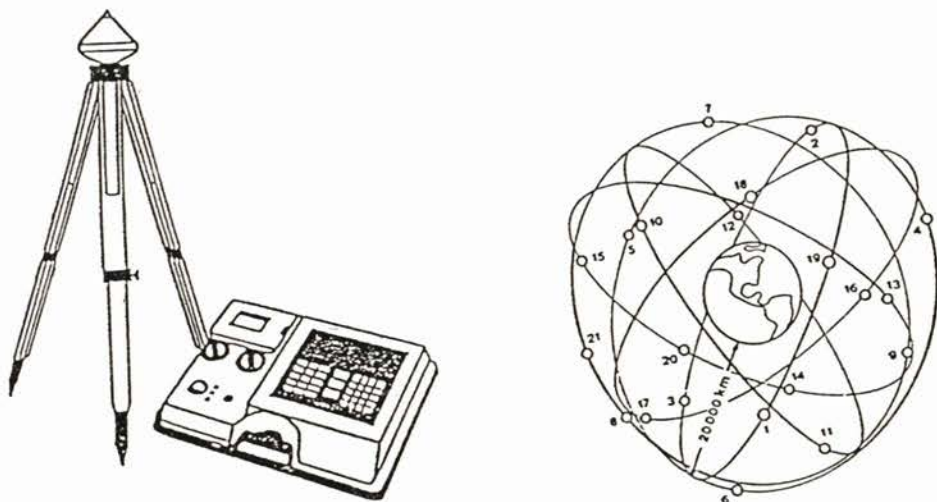
senzora je između dvije paralelno postavljene ploče kondenzatora postavljena inertna masa što se njiše. Inertna masa i kondenzatorske ploče C_1 i C_2 tvore diferencijalni kondenzator, koji spojen s detektorskim oscilatorom čini visokotočni pokazivač promjena duljina. Pokreće li se senzor uzduž osi instrumenta, koja prolazi kroz središta kondenzatorskih ploča i težištem inertnog tijela, tijelo dobiva ubrzanje i premješta se relativno u odnosu na ploče kondenzatora. Otklon se transformira u električni signal, koji se prenosi na upravljačku zavojnicu. U izmjeničnom djelovanju s poljem permanentnog magneta polje namota koji protječe struja izaziva protusilu koja kompenzira otklon. Struja koja protječe kroz zavojnicu proporcionalna je proizvedenom ubrzanju. Na balastnom otporniku stvara se napon koji je proporcionalan proizvedenoj struji. Napon se digitalizira, te odvodi na obradu do elektroničkog računala. Računalo može obraditi trenutačno ubrzanje; ono, prvi put integrirano, daje brzinu ovisnu o vremenu, a ponovnim integriranjem dobivamo promjene duljina.

Nagne li se kućište senzora, tijelo njihala uslijed svoje mase dobiva ubrzanje i pomiče se relativno prema kućištu. Između ubrzanja i nagiba kućišta u odnosu na nulti položaj postoji jednostavna funkcijska ovisnost. Proizvedena struja proporcionalna je izvedenom ubrzanju, a ono je proporcionalno nagibu kućišta. I ovdje se digitalizirani signali mogu obraditi na računalu.

Do sada opisani sustavi primjenjuju se na uskom, ograničenom prostoru — koji je npr. ograničen vanjskim oblikom građevinskog objekta. Međutim, često se dešava da na osnovi skupa točaka poznatih po koordinatama, interpolacijom računamo podatke za daljnje točke objekta.

Kod prostorno velikih zahvata, za izmjeru mreža viših redova, danas se primjenjuju satelitski pozicijski sustavi. Global Positioning System (GPS) sastoji se od tri segmenta: svemirskog, kontrolnog i korisničkog.

Svemirski segment sastoji se od 18 GPS-satelita, koji su raspoređeni na šest staza. Znači, na svakoj stazi kruže po 3 satelita. Staze satelita nagnute su prema ravnini ekvatora za 55° , a srednja udaljenost staza od površine Zemlje iznosi 20 200 km. Uz brzinu od 4 m/sek ophodno vrijeme iznosi 12 sati. Raspored satelita po stazama, uključujući i tri rezervna, prikazan je na slici 9.



Slika 9. Konstelacija satelita GPS-sustava, prijemna stanica s antenom i mjerni uređaj

Kontrolni segment sastoji se od glavne kontrolne stanice, koja se nalazi u Coloradu Springsu, i tri dodatne monitorske stanice. Glavni zadatak tih stanica je u određivanju predikcija satelitskih putanja (efemerida), koje se dobivaju iz mjerenih duljina i razlika duljina. Ti se podaci pomoću antena prenose u memoriju satelita. Otamo se dalje prenose do prijemnika korisnika.

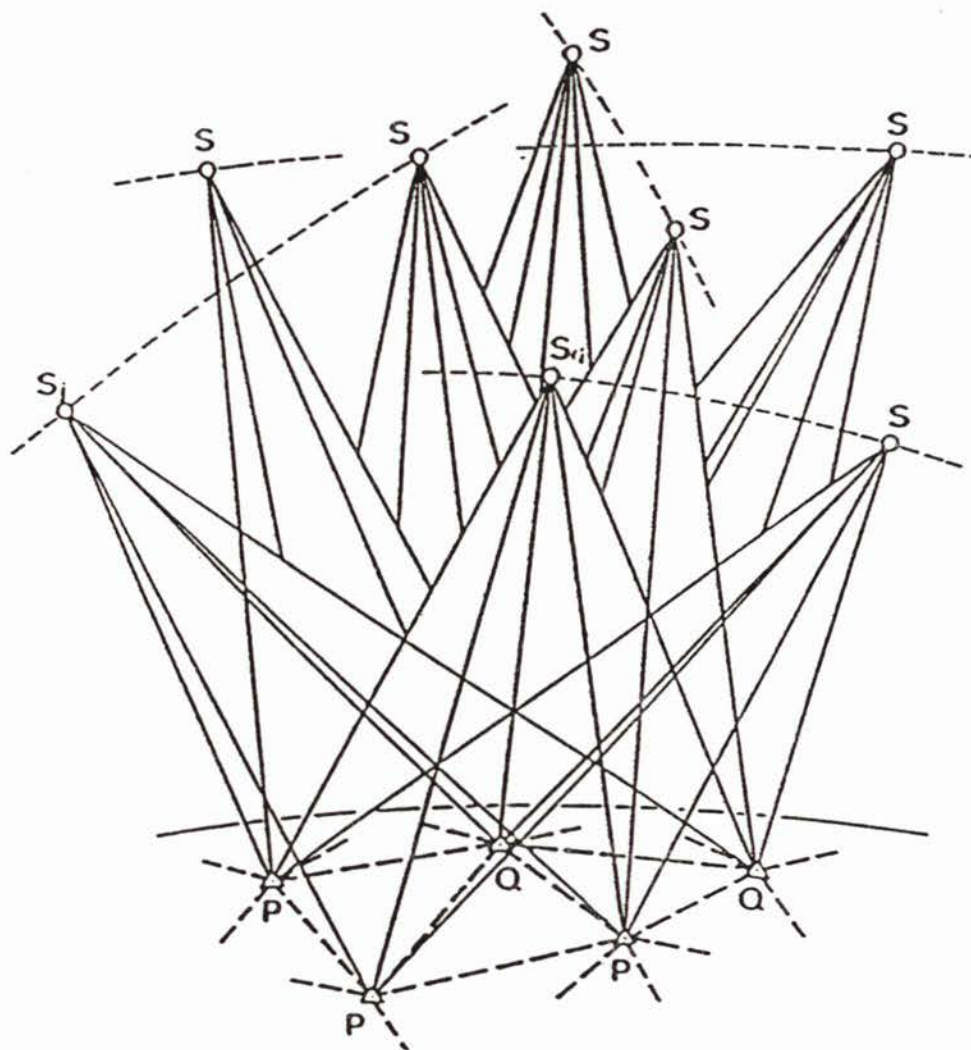
Korisnički segment čine mnogobrojni GPS-prijemni sustavi, koji pretežno služe u navigacijske i geodetske svrhe. U principu, ti se sustavi sastoje od antene i mjernog instrumenta (slika 9). Pomoću prijemnog uređaja određuju se pseudoudaljenosti, za koje se još moraju uzeti u obzir i korekture između antene prijemnika i antene satelita.

Kao rezultat jedne kampanje mjerenja dobiva se prostorna triangulacijska meža (slika 10), koja se prostire između prijemnika i satelita.

Poznate su pozicije satelita i dvije ili više terestričkih stanica, a koordinate ostalih točaka mogu se izračunati prostornim izjednačenjem mreže po metodi najmanjih kvadrata. Posebne prednosti ovoga postupka su:

- ne mora postojati dogledanje između točaka,
- primjena sustava ne ovisi o meteorološkim uvjetima.

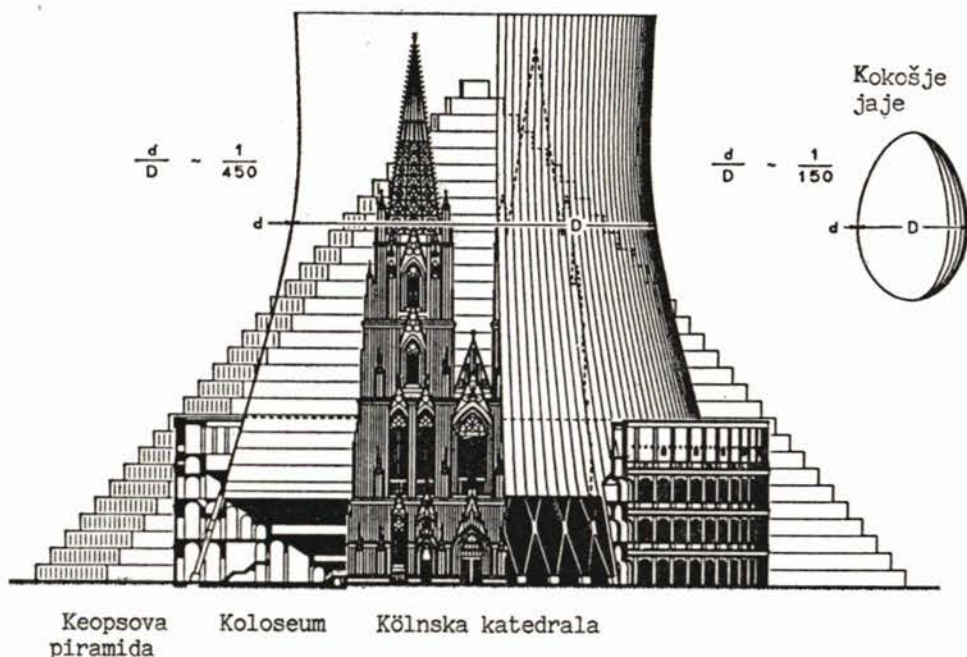
Opisani senzori samo su jedan ograničen izbor onoga čime danas raspoložemo. Kako se ti senzori primjenjuju za iskolčavanja, izmjere i kontrole građevinskih objekata, bit će prikazano u nastavku.



Slika 10. Mjerenje geodetske mreže pomoću GPS-sustava

3. RAČUNARSKI POTPOMOGNUTI VEKTORSKI GEODETSKI SUSTAV ZA UPRAVLJANJE PROCESOM GRADNJE I IZMJERU GRAĐEVINSKIH OBJEKATA

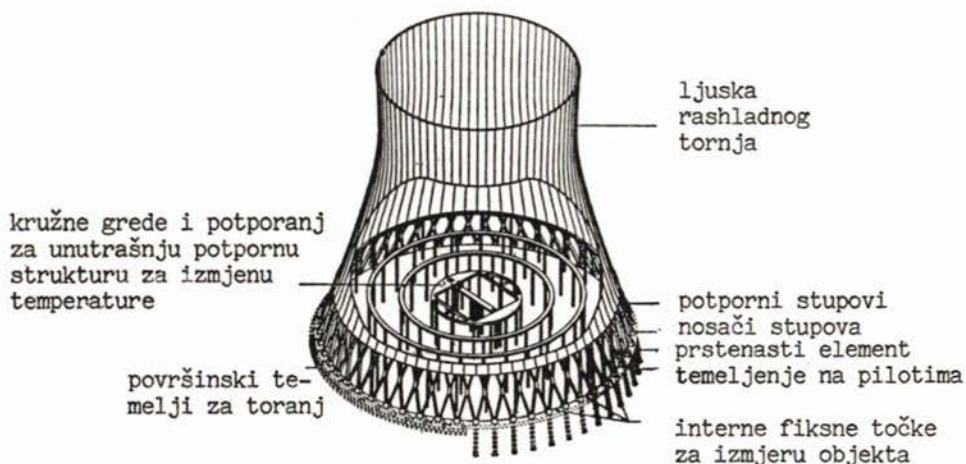
Danas se postavljaju visoki zahtjevi na geodetske sustave, pogotovo kad se radi o gradnji velikih industrijskih objekata. Oni moraju upravljački djelovati u procesu gradnje objekta, a istovremeno služiti i za njihov premjer. Na veličinu i smjelost modernih konstrukcija oplata upućuje primjer rashladnog tornja na slici 11. Slika 12 daje uvid u raznolikost geodetskih radova koji su kod takvog objekta neophodni.



Slika 11. Smjelost konstrukcije oplata rashladnog tornja

Geodetski sustav mora biti koncipiran tako da se:

- pri gradnji svih dijelova objekta primijeni isti instrumentarij i ista mjerna strategija,
- da se može primijeniti za različite objekte neovisno o sustavu oplata,



Slika 12. Armiranobetonski građevni elementi tornja za rashlađivanje (Dobjakob, Kahmen 1989)

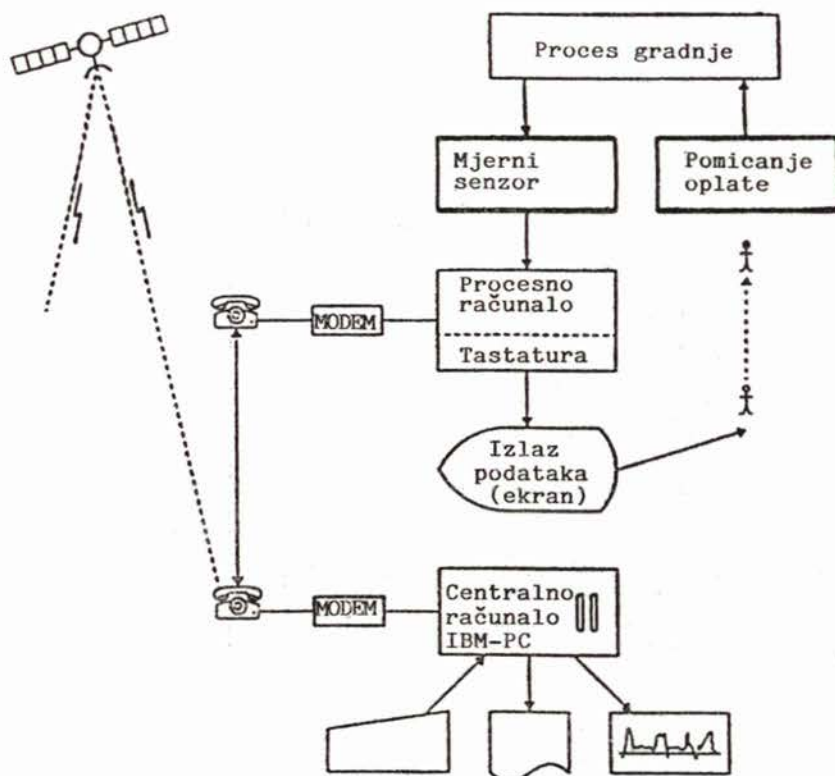
— mora ispunjavati sve zahtjeve u smislu iskolčavanja i izmjere objekta koje postavlja tvrtka izvođač radova, kao i zahtjeve investitora u smislu kontrole građenja,

— u pauzi gradnje služi se informacijama na osnovi kojih intervenira u proces same gradnje,

— dokumentaciju vodi objektivno, što znači da se radovi, počev od prikupljanja podataka do formiranja tabelarnih prikaza i grafika, moraju rješavati u automatskom toku podataka (on-line).

Današnji mjerni sustavi — koji se npr. sastoje od optičkog viska i vrpce — samo djelomično ispunjavaju navedene kriterije. U nastavku će biti prikazan vektorski mjerni sustav (Kahmen, Damjakob 1989), koji zadovoljava gore postavljene uvjete.

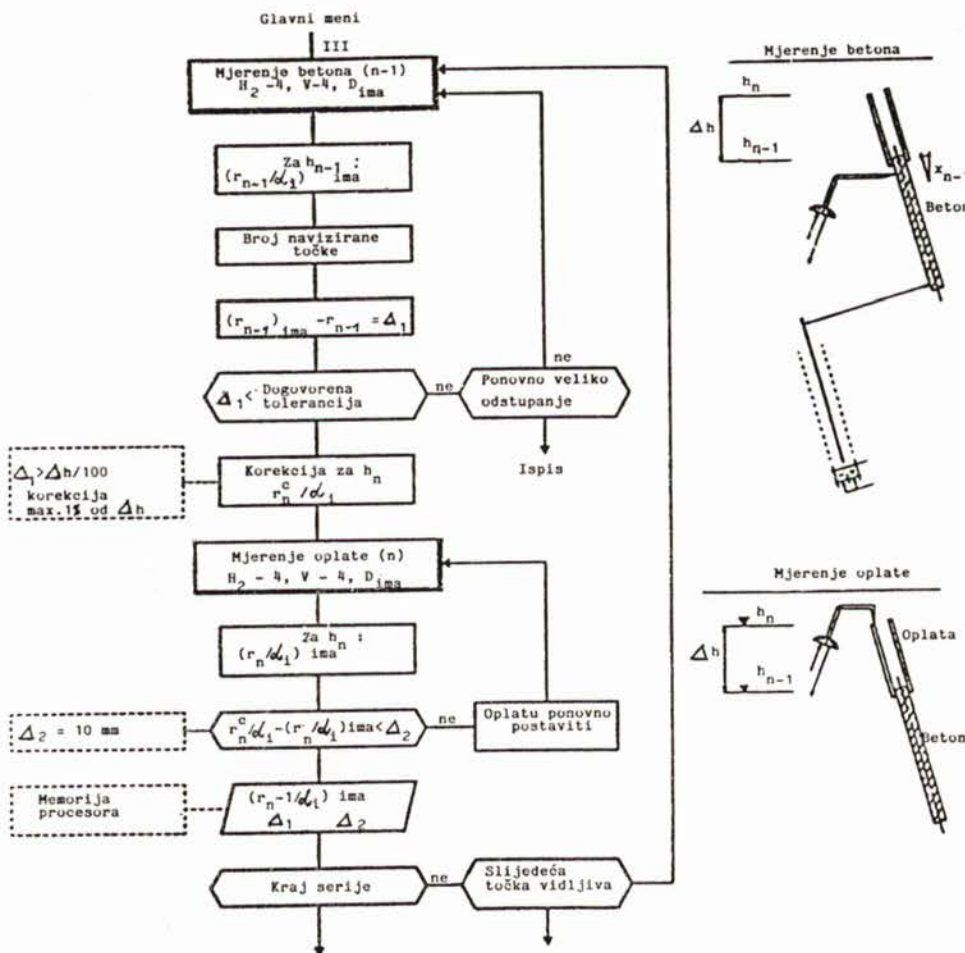
Računarski potpomognuti vektorski sustavi — koji kao temeljni element imaju elektronički tahimetar — omogućavaju, pomoću prostornih vektora, a u odnosu na koordinatni sustav mjernog instrumenta, iskolčavanje i izmjeru objekta u neprekinutom radnom toku. Prostorni vektori se mogu pomoću mikroprocesora mjernog instrumenta transformirati on-line u radialne vektore objekta. Kao što će se u nastavku teksta pokazati, na taj se način dobiva cijeli skup informacija, na osnovi kojih se može neposredno intervenirati u proces gradnje.



Slika 13. Vektorski mjerni sustav za upravljanje procesom gradnje armirano-betonskih objekata

Moguć je i prijelaz na Computer-Aided-Manufacturing (CAM). Tok rada i centralna jedinica prikazani su na slici 13. Za mjerenje je uzet elektronički tahimetar. Uz instrument se uzima još i lakoprenosivi mikrokompjutor. Za pravilno postavljanje oplata upotrebljavaju se uređaji za justiranje. Tok rada završava opažaćem, koji rukuje instrumentom i računalom i ima jednog radnika, koji rukuje uređajem za justiranje. Organizaciju podataka i dokumentaciju preuzima na sebe stacionarno računalo; to može biti i računalo iz grupe PC.

Tahimetar se može postaviti na proizvoljno sigurno mjesto unutar rashladnog uređaja (slobodno stacioniranje). Ta fleksibilnost je neophodna jer se često može desiti da uslijed radova u unutrašnjosti tornja pojedine vizure budu zaklonjene. Za pozicioniranje i orijentaciju tahimetra moraju se opažati pravci na najmanje dvije fiksne točke, a isto tako izmjeriti i duljine od stajališta instrumenta do fiksnihih točaka. U vezi s tim nužno je na teme-



Slika 14. Iskolčavanje i izmjera rashladnog tornja

ljima rashladnog uređaja označiti niz fiksnih točaka, te odrediti njihove prostorne koordinate u koordinatnom sustavu elektrane.

Na slici 14. prikazan je proces izmjere i gradnje rashladnog tornja. Nužno je napomenuti da se u pravilu ljsuke rashladnih uređaja betoniraju u prstenastim segmentima, od kojih je svaki visok oko 1 metar. Zadana »treba« geometrija ljsuke memorirana je u banci podataka stacioniranog računala. Za svaki prstenasti segment to su: gornji i donji radijus (r_{n-1} , r_n), odgovarajuće visine (h_{n-1} , h_n) i nagib d_{n-1} . Prije iskolčavanja ti se podaci u uredu iz memorije stacionarnog računala prenose u procesno računalo, isto tako u memoriju procesnog računala unose se i koordinate fiksnih točaka (x_m , y_m , z_m), koje se nalaze na temeljima tornja. Opažać na tahimetru vodi se kroz cijeli program tehnikom »menija«.

Prvo se opaža betonski zid neposredno ispod novopostavljene oplata. Točke na koje treba vizirati u pravilu su zaklonjene skelama. Stoga se pri mjerenju duljina i opažanju pravaca markica na koje se vizira i pripadni reflektor sa specijalno lakonosjećom drškom postavljaju radijalno pomaknuto u odnosu na točku objekta. Iz vrijednosti dobivenih tahimetrijskom izmjerom duljine držača i poznatog nagiba d_{n-1} prstenastog segmenta mogu se konačno izračunati »ima« radijusi (r_{n-1}/d_i) za zadane »treba« visine h_{n-1} ; d_i označava odgovarajuće azimute.

Opažać ne smije biti čvrsto vezan za redoslijed opažanja i iskolčavanje točaka objekta jer se može desiti da neke točke ne možemo opažati s jednog stajališta, ali ih je moguće vidjeti s drugog. Da bi se pod takvim uvjetima opažaću na instrumentu pojednostavila orijentacija i kasnija organizacija obrade podataka, automatski se pojedinim segmentima oplata pridružuju redni brojevi u odnosu na potpornje. U daljem programskom toku program kontrolira točnost izvedbe usporedbom »ima« radijusa sa »treba« radijusom r_{n-1} . Ako se npr. neka zadana granična vrijednost (npr. ± 50 mm) prekorači, mora se mjerenje i računanje ponoviti. Ako proračuni ponovno pokažu da su dozvoljena odstupanja prekoračena, smjesta o tome treba obavijestiti upravu gradilišta.

Ako je granična vrijednost zadržana, nastavlja se proces gradnje. Prvo, procesno računalo interpretira odstupanja u izvedbi ako ona postoje. Ako su odstupanja mala (npr. Δ_1 manji od 12 mm), nova oplata se iskolčava sa zadanim, konstruktivnim radijusom. Za statička opterećenja objekta od koristi je da meridijani ljsuke imaju što manje lomova. Stoga se odstupanja od nekoliko centimetara sukcesivno reduciraju. Način na koji se to izvodi (u procentima) vidi se na modelu prikazanom na slici 14. Korigirani radijus (r_n^c/d_i), koji sada zamjenjuje konstruktivni, automatski se računa na procesnom računalu.

Iskolčavanje elemenata oplata izvodi se prema opisanom toku radova. Prvo se na osnovi tahimetrijske izmjere računa gornji »ima« radijus elementa oplata (r_n/d_i) ima. Zatim se »ima« radijus uspoređi sa memoriranim korigiranim radijusom i kontrolira da li je odstupanje Δ_2 veće od granične vrijednosti (npr. $+ 10$ mm). Ako je to slučaj, element oplata se ponovno mora postaviti pomoću vijaka za namještanje. Ovaj se proces ponavlja tako dugo dok odstupanja ne postanu manja od graničnih.

Zadaci centralnog računala obuhvaćaju slijedeća područja:

— uspostavljanje banke podataka

- ulaz i izlaz podataka preko međuspoja (interfejsa) k procesnom računaru i preko tastature operatoru
- sortiranje mjerenih podataka
- obradu podataka
- dokumentaciju.

Obradeni podaci omogućavaju, neposredno poslije izgradnje jednog segmenta objekta (npr. prstenastog), prve iskaze o kvaliteti izvedbe. Sada se mogu dobiti liste o:

- odstupanju radijusa gornjeg ruba betoniranog segmenta
- odstupanju radijusa i visina gornjeg ruba novopostavljene oplata.

Zatim se mogu izračunati i statičke karakteristične veličine, koje stalno opisuju kvalitetu izvedenih radova. Karakteristične veličine te vrste su:

- maksimalna odstupanja radijusa i visina
- prosječna odstupanja radijusa i visina, kao i njihova standardna odstupanja.

Na taj su način uprava gradilišta i nadzorna služba izravno informirani o procesu gradnje i mogu u smislu osiguranja kvalitete upravljački intervenirati u tok izvođenja radova.

Isto tako, nužno je stalno nadzirati i kvalitetu izvedenog dijela objekta. Tu je od važnosti pokazatelje kvalitete vezati uz pravilni raster. Kod rashladnih uređaja meridijani i granične linije prstenastih segmenata čine prikladnu rastersku mrežu. Stoga se na osnovi ranije izračunatih radijusa u proizvoljnim točkama objekta moraju interpolacijskim postupkom izračunati radijusi kutnih točaka rastera. »Treba« i »ima« radijusi rasterskih točaka početni su podaci za različite kvalitativne kontrole geometrije oplata.

Opsežne kvalitativne kontrole daju radijalna odstupanja u rasterskim točkama i odstupanja oblika (razlike između »treba« i »ima« nagiba) uzduž rasterskih linija, kao i njihove statističke karakteristične veličine. To mogu biti maksimalne i prosječne vrijednosti, kao i njihova standardna odstupanja.

Odstupanja od zadane geometrije (od oblika) računaju se za odsječke linija konstantne duljine. Mjera za odstupanje ΔF , za jedan odsječak linije u smjeru meridijana, dana je kvocijentom

$$\Delta F = \frac{\Delta r_{i-1} - \Delta r_i}{\Delta L},$$

pri čemu su sa Δr_{i-1} i Δr_i označena odstupanja na krajnjim točkama odsječka linije, a sa ΔL duljina odsječka linije.

Opisani sustav mjerenja primijenjen je prvi put na jednom gradilištu u južnoj Africi. O bogatim iskustvima s tog gradilišta izvještava se u (Damjakob, Kahmen, Lösekraut 1989.).

U budućnosti se može pri upotrebi pomičnih oplata, čiji se elementi meridijalno pomiču uvis, za upravljanje procesom gradnje i izmjeru primijeniti mjerni robot. On automatski prati vizirne markice na pomičnoj oplati i vodi ih u »treba« — poziciju. Tok rada prikazan na slici 13. izvodi se tada potpuno automatizirano.

LITERATURA

- Damjakob, H., Kahmen, H. u Lösekraut, H. (1989): Qualitätsorientierte Steuerung des Fertigungsprozesses von Stahlbetonbauwerken mit vektoriellen Vermessungssystemen, In »Optical 3—D Measurement Techniques« (Gruen/Kahmen) Herausgeber, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1989.
- Gottwald, R. (1987): Kern E2—SE — Ein neues Instrument nicht nur für die Industrievermessung. Allgemeine Vermessungsnachrichten 1987, 4, 147—154.
- Huep, W. u Katowski, O. (1988): Theodolitsysteme für industrielle und geodätische Messungen. Technische Rundschau 1988.
- Kahmen, H., Suhre, H. (1983): Ein lernfähiges Vermessungssystem zur Überwachung kinematischer Vorgänge ohne Beobachter, Zeitschrift für Vermessungswesen (1983, 8, 345—351).
- Kahmen, H. (1986): Vermessungssunde II, Walter de Gryter, Berlin — New York, 1986.

COMPUTER-AIDED MEASURING METHODS AND ROBOTS FOR SETTING AND SURVEYING OF BUILDING AND BRIDGE CONSTRUCTIONS

The paper describes modern land surveying systems used in setting out and control of large building constructions. They are based on computer-aided measuring methods and robots. A practical application of the described measuring system is explained by an example of a nuclear power plant cooling tower construction in South Africa.

Primljeno: 1991-03-08