

Kuu piltide fotogramm-meetiline uurimine: mõõtes Apollo pärandit

Vladislav-Veniamin Pustõnski

Viimati käis Apollo ekspeditsioon Kuul üle 50 aasta tagasi, kuid juba praeguse aastakümne lõpuks peaksid inimesed taas meie maakera kaaslase pinnale jõudma. Selle ootuses on Kuu-uuringud taas hoogustunud, mitu riiki ja isegi erafirmad on saatnud sinna kosmoseaparaate. Ehkki uut infot on palju, pakuvad Apollo programmist pärinevad Kuu-fotod endiselt väärtuslikke andmeid. Ajakohased uurimismeetodid, nagu arvutipõhine fotogramm-meetria, võimaldavad neid ajaloolisi fotosid uurida uue pilguga.

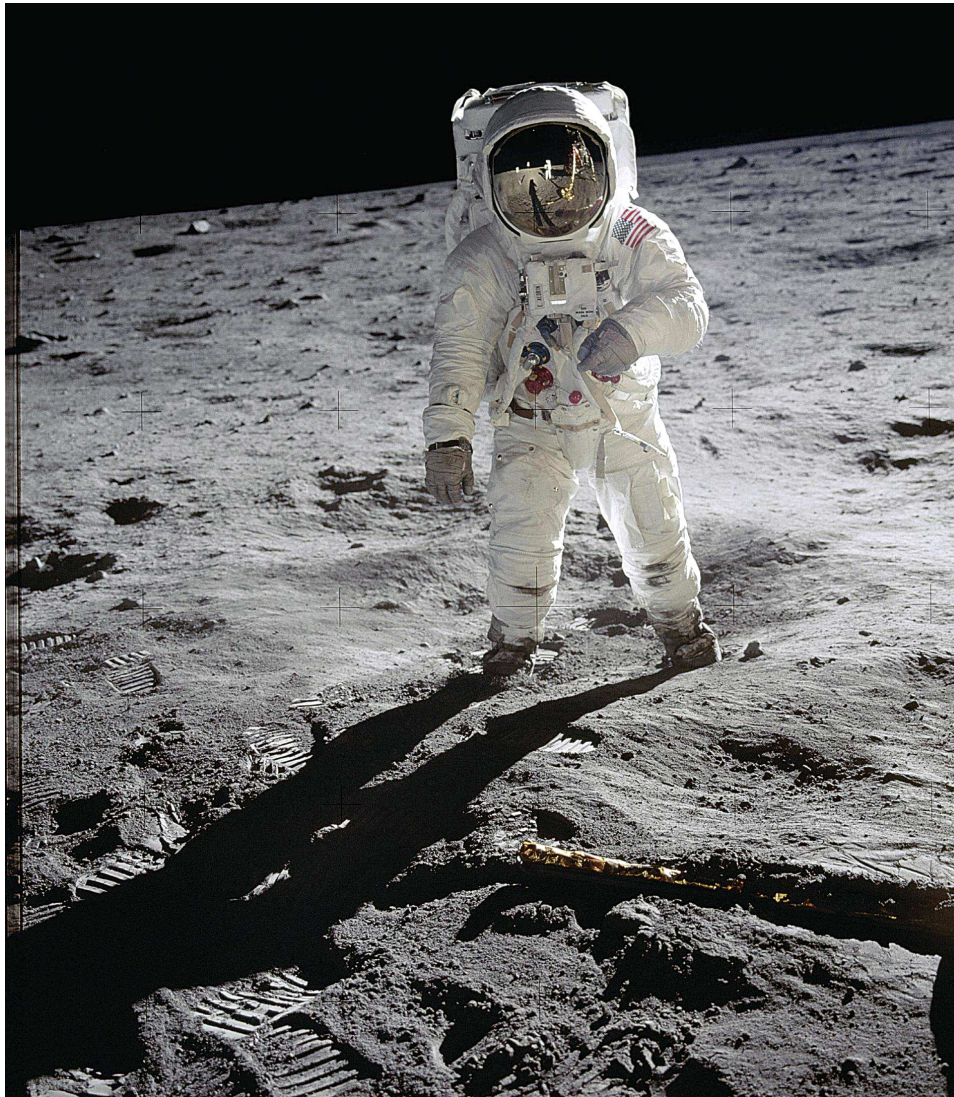
Astronauudid pildistavad Kuud

Apollo programmi kuuel maandumissioonil astus Kuu pinnale kaksteist inimest. Astronauudid tegid ulatuslikke teadusuuringuid ja jäädvustasid oma tööd ka fotodel. Apollo 11 meeskond tegi 2,5 tundi kestnud välitöödel umbes 120 pilti, kuid viimaste ekspeditsioonide kolmepäevaste missioonide tulemusel saadi tuhandeid fotosid. Selleks kasutati eriliselt kohandatud Hasselbladi keskformaadi kaameraid. Aparaadilt eemaldati pildiotsija, kuna astronauudid ei saanud seda kiivri tõttu kasutada, ja suurendati hoobade mõõtmeid. Ülekuumenemise vältimiseks värviti kaamerad heledaks ja eemaldati kõik määrded, et need vaakumis ei aurustuks. Filmi ette paigaldati märgistustega plaat: nõnda tekkisid fotodele väikesed ristid, mis aitasid korrigeerida töötlemise moonutusi. Kaamera peaobjektiiv oli Zeiss Biogon, millega sai teha vähimate moonutustega pilte. Viimastel missioonidel oli kaamerale lisatud teleobjektiiv, jäädvustamaks kaugemaid objekte. Fotod talletati Kodaki filmile.

Et kaameraid oleks mugavam kasutada, olid need kinnitatud astronautide rinnale, kuid vajaduse korral sai neid hõlpsasti lahti võtta. Pildistamise plaan oli hoolikalt ette valmistatud: astronauudid tegid panoraamvõtteid, jäädvustasid varustust ja pinnaseproovide võtmise kohti. Peale fotokaamerate rakendati 16 mm filmikaamerat ja telekaamerat, millega edastati otseülekandeid juhtimiskeskusesse. Seega on Kuu ekspeditsioonide kohta talletatud väga põhjalik fotodokumentatsioon.

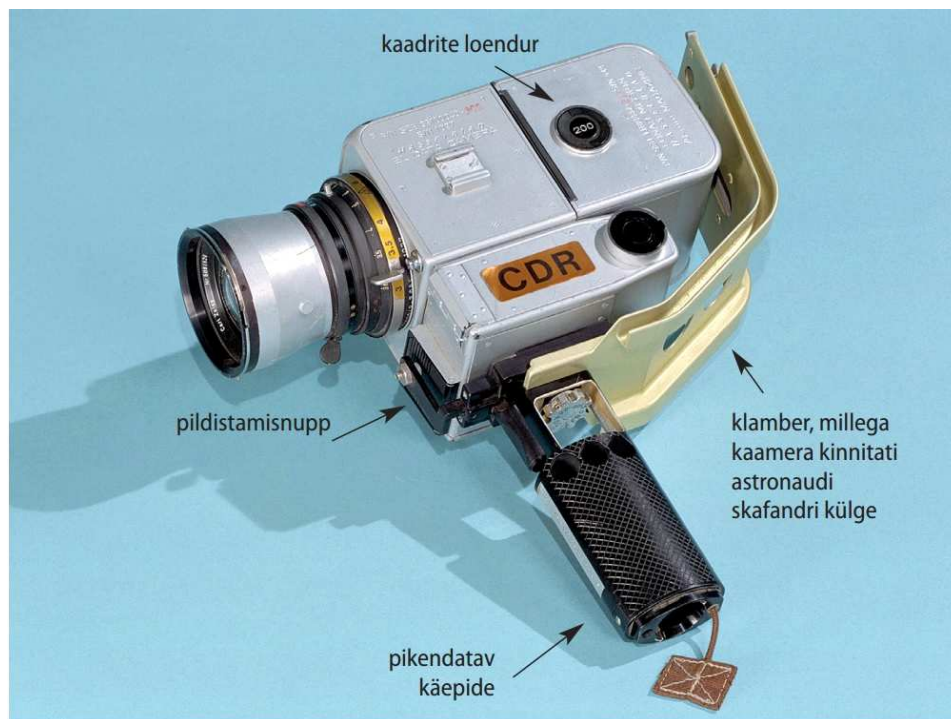
Kuu pildid ja fotogramm-meetria

Olen alati olnud suur kosmosetehnika ja Apollo programmi huviline. Kuu fotosid vaadates tekkisid mul küsimused: kas saaks täpselt teada, kus seisis astronaut kaameraga, kui kõrge oli lipumast või kui täpselt oli sideantenn suunatud Maa poole. Üksik foto ei anna vastuseid, kuna pildistamisel projitseeritakse kolmemõõtmeline ruum kahemõõtmelisele filmipinnale, niimoodi kaob paratamatult osa infost. Näiteks ei näita üks foto mõne objekti kaugust, sest kaugel suur objekt võib paista



20. juulil 1969. aastal esimesed inimesed Kuule toonud missiooni Apollo 11 kuumooduli piloot Buzz Aldrin seisab mooduli jala lähedal. Missiooni ülem Neil Armstrong tegi selle ikoonilise foto 70 mm Kuu-kaameraga. Aldrini skafandri visiidil on näha peegeldumas ka Armstrong ise, heleda täpina Maa, kuumoodul Eagle ja selle lähedale asetatud USA lipp ja teaduslike katsete seadmed. Armstrong hoidis kaamerat kergelt pööratuna, lõigates sel moel pildi ülaseru ära Aldrini elusüsteemiga seljakoti pealmise osa ja sellel olnud sideantenni. Seda üldsusele mõeldud fotot on veidi pööratud päripäeva, et anda Aldrinile loomulikum püstine asend. Tema pea kohal on lisatud ka musta ala, et taastada puuduv Kuu taevas. Foto: NASA

samasugune kui lähedal asuv väike objekt. Küll aga saab mitme eri nurkade alt tehtud foto abil määrata objektide kuju, asukoha ja isegi kaamera koordinaadid ning suuna. Seda võimaldab fotogramm-meetria: teadusharu, mis määrab matemaatilise analüüsi teel objektide täpse asukoha mitme foto põhjal.

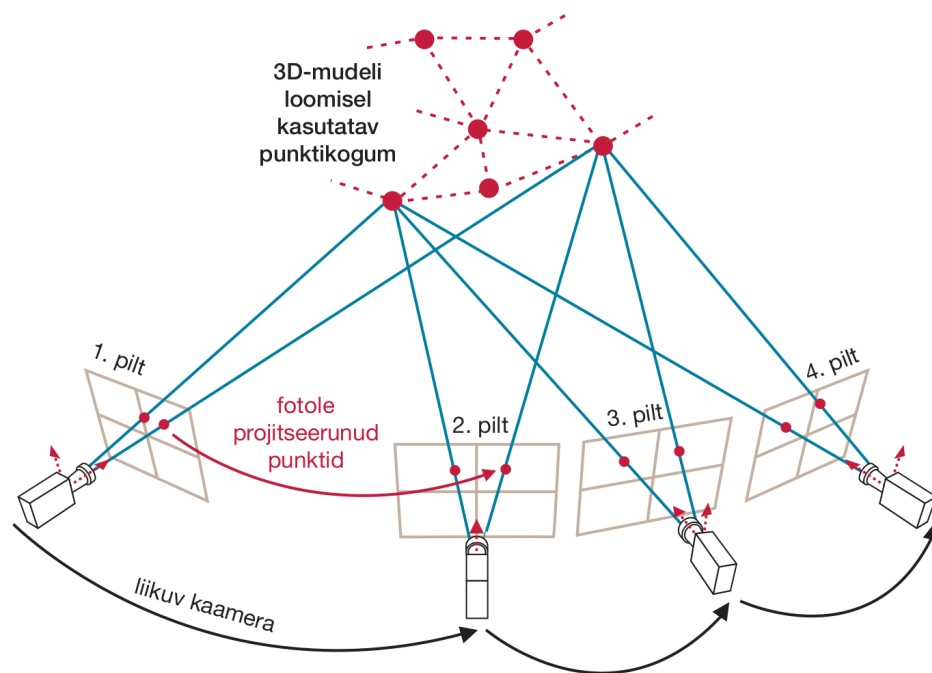


Kuu-kaamera Hasselblad 500EL. Foto: NASA

Fotogramm-meetria

Kui eri fotodelt on leitud samad punktid, saab arvutada nende asukoha ruumis. Apollo-ajastul tehti niisuguseid arvutusi ligikaudsete meetoditega, kuid praegusajal on see jäetud arvutite hooleks. Fotogramm-meetriat saab rakendada näiteks arheoloogias, et modelleerida kaevandeid, kriminalistikas arvutatakse kuu-
 lide trajektore ning arhitektuuri, restaureerimise ja loomevaldkonnas luuakse 3D-mudeleid ja isegi kunstiteoseid. Objekti 3D-mudeli loomiseks pildistatakse seda eri nurkade alt, kasutades kalibreeritud kaameraid, vahel ka spetsiaalset valgustust ja droone. Tarkvara määrab automaatselt kindlaks kõrgus- ehk nn reeperpunktid ja loob mudeli. Aga miks mitte modelleerida sama põhimõtte järgi Apollo maandumise kohti? Missioonidel rakendatud kaamerad ja nende objektiivid olid ju väga korralikud ning fotodel Kuu pinnal nähtavad seadmed ja kivid sobiksid reeperiteks. Ent siin ilmnes kaks probleemi. Esmalt fotode vähesus: ehkki pilte on palju, võib osa objekte olla jäädvustatud ainult mõnel fotol. Teisalt pidi arvestama tõsiasja, et Kuul puudub atmosfäär ning see suurendab fotode kontrasti ja muudab reeperpunktide tuvastamise keeruliseks.

Hoolimata nendest probleemidest on viimastel aastatel Kuu objektide 3D-mudelite kohta ilmunud mitu teadustööd, sealhulgas virtuaalseid mudeleid ekspeditsioonide ajal pildistatud suurematest rahnudest. Siiski pole maandumiskohtadest loodud veel täielikke 3D-mudeleid. Tõenäoliselt tuleneb see asjaolust, et mainitud probleemid ei lase arvutusprogrammidel tuvastada reeperpunkte eri fotodelt automaatselt. Ent mina leidsin, et kui määrata vajalikud reeperpunktid fo-



Joonisel on kujutatud fotogramm-meetria tööpõhimõtet. Skeemil on näha, kuidas uuritava objekti punktikogum projekteerub eri asukohtadest tehtud fotodel. Sel moel saabki fotogramm-meetriat appi võttes luua eri nurkade alt tehtud fotode põhjal uuritava objekti 3D-mudeli. Joonis on koostatud 3D-tehnoloogiaettevõtte ZG materjalide alusel. Joonis: HORISONT

todel käsitsi, saab luua maandumiskoha digimudeli, mille täpsus ulatub kuumooduli lähedal paari sentimeetrini. Minu esimene proovikivi oli Apollo 11 maandumise kohast loodud mudel. Selle põhjal koostatud kaart ühtis orbitaalsete fotodega, mille oli teinud ümber Kuu tiirlev NASA sond Lunar Reconnaissance Orbiter. Asjaomase kaardi ja maandumiskoha 3D-mudeli kirjelduse leiavad huvilised Apollo Lunar Surface Journali veebilehelt (NASA toetatud harrastusteadusprojekti on talletatud põhjalik Apollo programmi materjalide arhiiv). Seejärel valmisid ka Apollo 12 ja Apollo 14 maandumise kohtade mudelid. Viimase loomisele on oma bakalaureusetöö raames aidanud kaasa ka Siim Pugal.

Kuidas määrata piltide skaalat ja orientatsiooni

Kuu digimodelite loomisel tuleb lahendada mitu kitsaskohta. Näiteks kuidas määrata mudeli skaalat ja orientatsiooni? Fotodel puuduvad ju mõõdulindid, horisontaaljooned ja viited ilmakaartele. Õnneks sobivad skaala määramiseks suurepäraselt Kuule laskunud moodulid, mille mõõtmed on teada millimeetri murratuna täpsusega. Kuna moodulid on jäädvustatud paljudele fotodele, saab neid mudelis täpselt mõõta. Skaalat saab kontrollida ka orbitaalsete fotode põhjal, kus on selgelt näha kaugemal asuvad instrumendid, mille koordinaadid on määratud aerofotogramm-meetria meetoditega. Samad instrumendid on jäädvustatud ka astronautide fotodel, mistõttu on need kaasatud 3D-mudelisse. Kui võrrelda

koordinaate orbitaal- ja pinnafotodel, saab lõplikult kinnitada mudelite mõõtka-va täpsuse.

Asendit ilmakaarte suhtes oli mudelis raskem arvesse võtta, aga siingi leidsin lahenduse. Täpselt nii nagu meremehed on rakendanud Päikest, Kuud ja tähti laeva asukoha määramiseks, saab ka Kuul kasutada taevakehi. Teades maandumiskoha täpseid koordinaate, pildistamise aega (astronautide ja juhtimiskeskuse salvestiste põhjal) ning taevakehade asendit, saab 3D-mudeli joondada nii, et taevakehade suunad langeksid mudelis kokku nende arvutuslike asukohtade omadega. Taevakehade asendeid saab igal hetkel ja Kuu igas punktis määrata digiplanetaariumi abil. Kui mudel on joondatud, on võimalik teha kindlaks horisontaaltasand ja ilma-kaared. Samalaadse meetodi järgi määratakse astronavigatsioonis kosmoseaparaatide asend. Kosmoses kasutatakse tavaliselt reeperitena Päikest ja tähte Kanopus. Kuul osutusid sobivateks objektideks Päike ja Maa.

Orientatsiooni täpsust saab kontrollida mitmel moel. Esiteks saab võrrelda astronautidest maha jäänud seadmete suundi orbiidifotode põhjal leitud asimuutidega. Teiseks võib mõõta kuumooduli kaldenurka ja võrrelda seda pardal olnud navigatsioonisüsteemi näitudega. Kolmandaks saab kontrollida, kuivõrd täpselt oli astronautide paigaldatud sideantenn suunatud Maale. Need moodused näitavad fotogramm-meetria võimsust: üksikute Kuu-fotode põhjal saab suundi määrata üksnes ligikaudu, kuid 3D-mudel võimaldab need välja arvutada kraadi mürdosa täpsusega. Taevakehade kasutamine osutus väga tõhusaks: kõik mudelis tehtud mõõtmised langesid lubatud veapiirides kokku teiste sõltumatute andmetega.

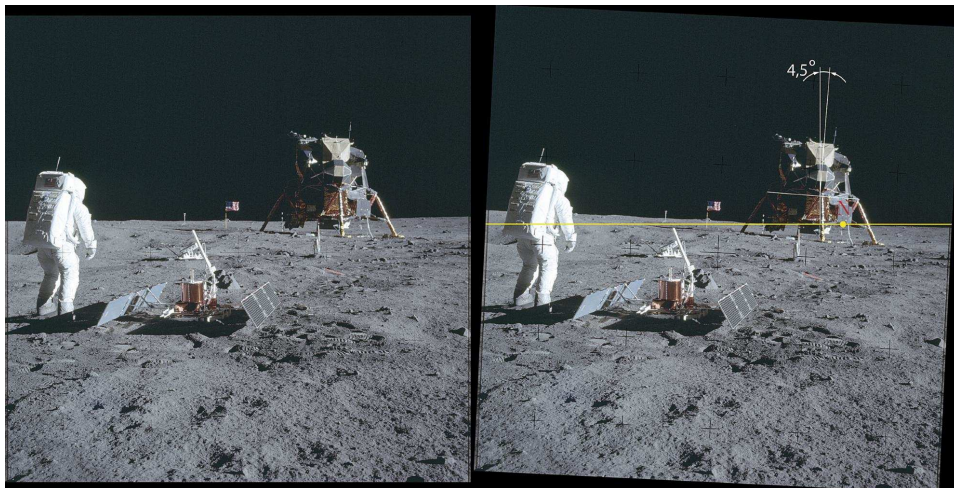
Kas horisont on viltu

Astronautide sõnul oli neil Kuul pinnase kallakut mitmel põhjusel keeruline hinnata. Seejuures tekitas raskusi Kuu vähenenud gravitatsioon (umbes kuus korda väiksem kui Maal), skafandrist tingitud liikumiskiirangud ning turvasüsteemiga seljakott, mis nihutas raskuskeset. Seetõttu ei tajunud nad sageli väikeseid kallakuid ja tegid fotosid, toetudes oma keha asendile. Seega ei saa fotodel oleva horisondi kalde põhjal teha järeldusi tegeliku pinnakalde kohta. Fotogramm-meetiline mudel sisaldab aga kaamera pöördenuurga teavet, mis võimaldab kohandada fotosid nii, et need näitaksid tegelikku kuupinna kallet.

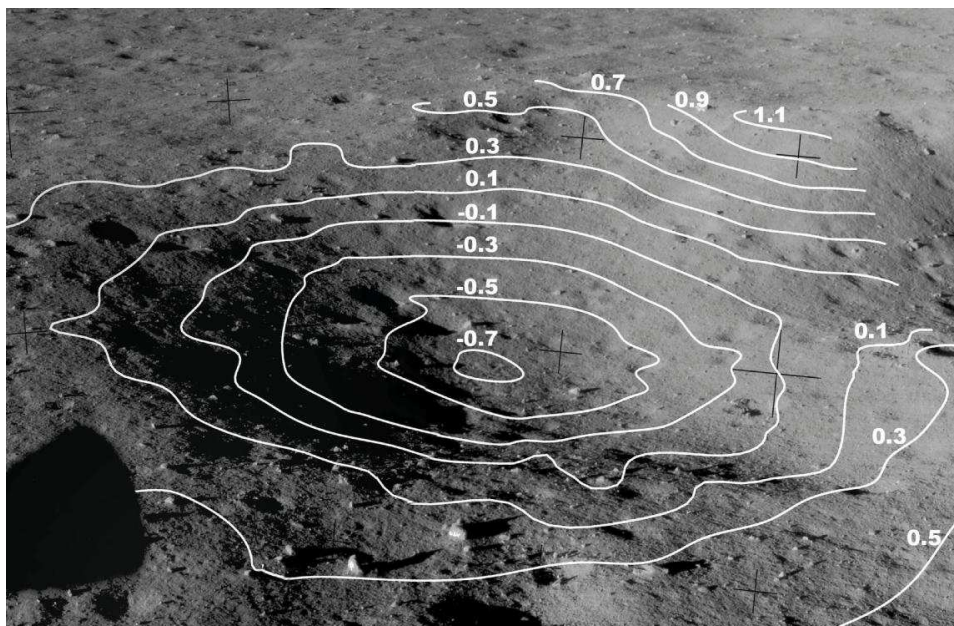
Apollo 11 maandumise paik on eriti huvitav, sest kuumoodul maandus väikese poolteise meetri kõrguse „luite“ nõlvale. Nõlva tipp asus mooduli akende ees mõnekümne meetri kaugusel. Navigatsioonisüsteem tuvastas maandumisel kallaku olemasolu, mõõtes mooduli kalde: umbes 4,5 kraadi ida poole. Nõlv paistab selgelt ka orbitaalfotodel, kus madala Päikese valgus toob esile heleduse muutused. Astronautide fotodel pole see nõlv alati hästi näha, tõese kallaku rõhutamiseks tuli üht pilti natuke viltu keerata. Algsel fotol näis moodul olevat peaaegu vertikaalne.

Mõõdame kraatreid ja joonistame tähti

Digitaalne mudel võimaldab näiteks täpselt määrata Kuu pinnal olevate kivide asukoha ja orientatsiooni enne, kui astronautid need Maale tõid. Niisugused andmed on väärtuslikud proovide „magnetilise ajaloo“ tarbeks: kuigi Kuul puudub globaalne magnetväli, talletavad kivid jääkmagneetumust, mille on põhjustanud kohalikud magnetväljad nende tekke ajal (näiteks kivide jahtumisel pärast meteoriiditambamust). Digimudeli abil saab statistiliselt uurida Kuu kraatreid ja kivide jaotust ning luua täpseid reljeefikaarte.



NASA fotol AS11-40-5948 (vasakul) paistab missioonil Apollo 11 Kuule laskunud mooduli alune pind horisontaalne. Parempoolsel pildil on sellel kollase joonega tähistatud tegelik horisont ja pilti on pööratud nii, et see joon oleks tõepoolest horisontaalne. Mooduli juures olev punkt N näitab põhjasuunda. Keeratud pildil on kuumooduli kalle itta hästi näha. Esiplaanil seisab Buzz Aldrin seismomeetri juures, kuumoodulist vasakul on lipp ja TV-kaamera. Pilt: NASA / VLADISLAV-VENIAMIN PUSTÕNSKI



Pildil on Kuu kaksikkraatri (Double Crater) idaosa. Apollo 11 kuumoodul maandus sellest vaid mõne meetri kaugusel kirdes. Maastiku 3D-mudel võimaldas leida samakõrgusjooni, mis kujutavad kraatri topograafiat. Kõrgused on esitatud meetrites; nullkõrgus vastab mooduli jalgade keskmisele kõrgustasemele. Pilt on koostatud NASA fotodest AS11-39-5759 ja AS11-39-5761, mis on tehtud kuumooduli aknast. Pilt: NASA / VLADISLAV-VENIAMIN PUSTÕNSKI

Digimudelite järgi saab Kuul tehtud fotodel määrata kindlaks tähti. Tavapärasel Kuu-fotodel on näha ainult Päike, Maa ja mõnikord Veenus, kuna kaamerad olid keskendunud Kuu pinnale, astronautidele ja varustusele, jättes tähed lühikese säraja tõttu nähtamatuks. Siiski lootsin, et kõige eredamad tähed, nagu Siirius ja Kanopus, või planeet Jupiter võiksid paista pisikeste täppidena. Selleks et sääraseid täppe tuvastada ja pildidefektidest eristada, peab teadma kaamera suunda ja täpset taevakehade asukohta pildistamise ajal. Siin tulevad appi digitaalne mudel, astronautide suhtluse salvestused ja tähekataloog. Nii olen koostanud arvutiprogrammi, mis lisab Apollo-fotodele tähed ja planeedid. Kahjuks ei ole eredad planeedid ega Siirius jäänud mudelites kasutatud fotode kaadrisse. Kanopus oleks pidanud olema mitmel pildil, kuid fotode säriaeg oli tema tuvastamiseks liiga lühike. Sellegipoolest õnnestus taastada tähistaevas niisugusena, nagu astronautid oleksid seda näinud, kui ere Kuu-valgus ja kiivri filter poleks seganud.

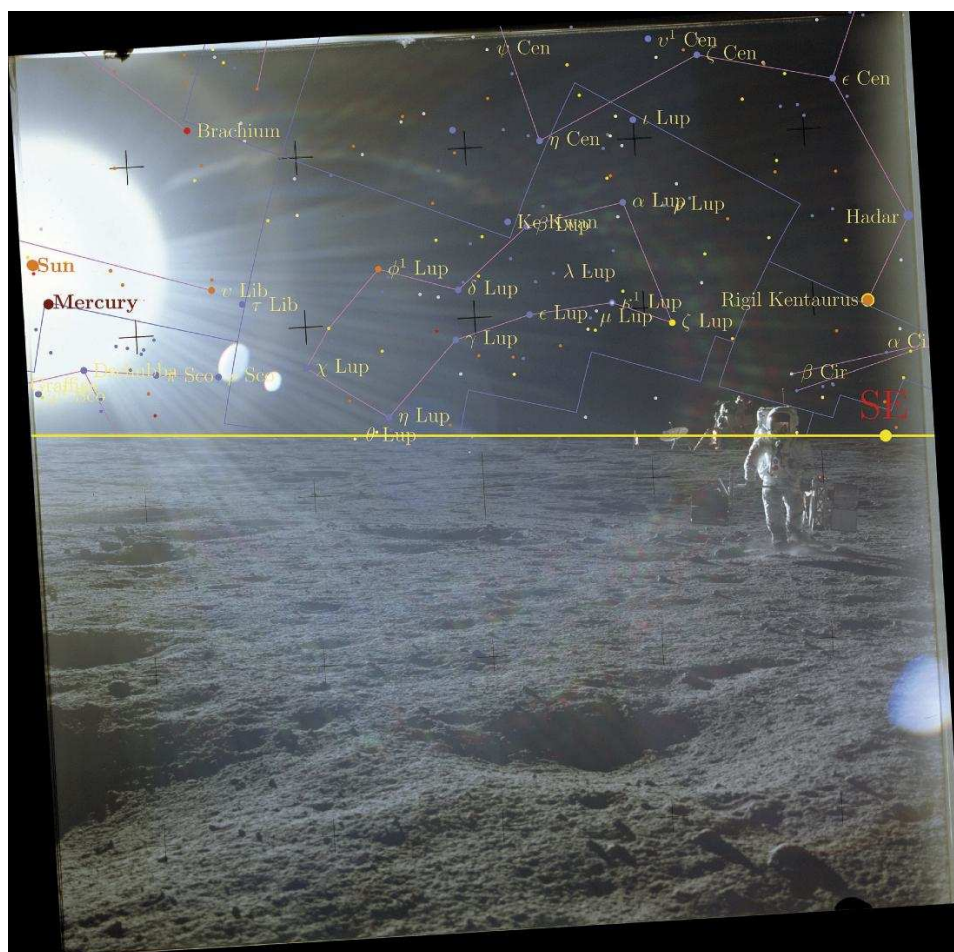
Sama arvutiprogramm sobib ka liitreaalsuse loomiseks: Kuul tehtud fotodele saab lisada virtuaalseid objekte, nii staatilisi kui ka liikuvaid. Nõnda saab luua näiteks planetaariumi või õppemudeli, mis võimaldab uurida Kuu raskusväljas vabalt langevaid ja pöörlevaid kehasid.

Töö Apollo maandumiskohtade arvutipõhiste 3D-mudelite kallal annab uusi võimalusi uurimaks arhiivandmeid ning aitab teadlastel ja kosmosehuvilistel taas elustada ajalooliste ekspeditsioonide hetki. Selline teadust, tehnoloogiat ja kosmosehuvi ühendav käsitusviis lubab Kuud uurida seninägematu täpsusega ja teha avastusi, mida maailmaga jagada.

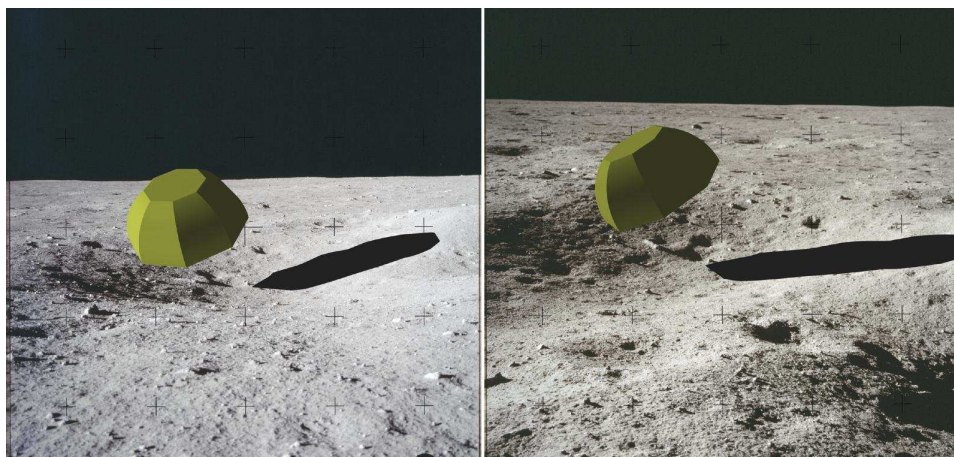
Loe lisaks: Apollo 11 maandumiskoha fotogramm-meetriline uurimus: www.nasa.gov/history/alsj/a11/a11Photogrammetry.html



NASA fotole AS11-40-5867 on lisatud tähed ja tähtkujud ning foto on keeratud nii, et tõeline horisont, mida tähistab kollane joon, oleks horisontaalne. Punktid N ja NE näitavad põhja- ja kirdesuunda. Pildil seisab redelil missiooni Apollo 11 kuumoodulist väljunud Buzz Aldrin. Taustal paistab Väike Vanker ja selle heledaim täht Põhjajael (Polaris, tähesuurus +2,0). Erinevalt Maast ei asu Kuul nähtud Põhjajael täpselt põhjapunkti kohal, sest Kuu pöörlemistelg ei ole Maa omaga paralleelne. Kuna kuupind laskub kirde suunas, on nähtav horisont madalamal kui tõeline horisont. Tähtede asukohad on tähistatud täppidega, mille suurus ja värv vastavad nende värvusele ja heledusele (tähesuurus kuni +6). Pilt: NASA / VLADISLAV-VENIAMIN PUSTÕNSKI



NASA fotol AS12-46-6806 kannab Apollo 12 piloot Alan Bean instrumente paigalduskohta, mis asub kuumoodulist umbes 130 m kaugusel. Temast üles paremale jääb Rigil Kentaurus ehk Alpha Centauri, üks maakerale lähimaid tähti. Päikese halo keskel on näha Päikese ketas tegelikus suuruses ning halole on projekteerunud ka Merkuur. Pilt: NASA / VLADISLAV-VENIAMIN PUSTÖNSKI



Fikseeritud asendiga virtuaalne 3D-keha (aluse raadius 3 m) on lisatud Apollo 11 fotodele AS11-40-5852 ja AS11-40-5889 liitreaalsuse objektina. Vari on loodud, arvestades kohalikku pinnamoodi ja pildistamise hetke Päikese asendit, ning kehade valgustatus on modelleeritud Päikese asendi ja Kuu pinnalt hajunud valguse järgi. Pilt: NASA / VLADISLAV-VENIAMIN PUSTÕNSKI