hyväksymispäivä arvosana

arvostelija

Apollo-lentojen ohjausjärjestelmä

Seppo Hätönen

Helsinki 2.5.2006

Seminaaritutkielma

HELSINGIN YLIOPISTO
Tietojenkäsittelytieteen laitos

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty	Laitos — Institution — Department
Matemaattis-luonnontieteellinen	Tietojenkäsittelytieteen laitos

Tekijä — Författare — Author

Seppo Hätönen

Työn nimi — Arbetets titel — Title

Apollo-lentojen ohjausjärjestelmä

Oppiaine — Läroämne — Subject

Tietojenkäsittelytiede

Työn laji — Arbetets art — Level	Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages
Seminaaritutkielma	2.5.2006	13 sivua

Tiivistelmä — Referat — Abstract

Apollo-lennot olivat teknologian taidonnäyte 60-luvulla, eikä vähäisin niistä ollut Apollo Guidance Computer. Tämä hidas ja vähämuistinen kone mahdollisti kuulennot ja turvallisen laskeutumisen kuuhun ja paluun maahan. Sen rooli muuttui suunnittelun myötä täysin itsenäisestä tietokoneesta osittain maasta kontrolloiduksi. Se kuitenkin säilytti kyvyn tuoda astronautit maahan täysin itsenäisesti.

ACM Computing Classification System (CCS): K.2.a History of computing

B.0 Hardware:General

J.7.a Computers in other systems: Command and control

Avainsanat — Nyckelord — Keywords

Apollo, NASA, Apollo Guidance Computer, AGC, AGS

Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited

Muita tietoja — övriga uppgifter — Additional information

Sisältö

1 Johdanto

Kun Apollo-ohjelma oli alkutekijöissään, tehtiin tutkimus kuuhun laskeutumisen vaatimuksista. Eräs niistä oli kyky ohjata avaruusalus kuuhun ja turvallinen laskeutuminen kuun pinnalle. Tämän vaatimuksen toteutumisen todettiin vaativan kuualukseen oman tietokoneen. Alkuperäiset syyt tähän oli estää vihamielinen häirintä, valmistautuminen miehitettyihin planeettojen välisiin lentoihin sekä välttää maa-asemien suurta määrää. Kuitenkaan mikään näistä syistä ei lopulta ollut kovin suuri tekijä ja pääsyiksi nousi 1.5 sekunnin tiedonsiirtoviive ja se, että kuun kiertoradalla suoritettava kohtaaminen tapahtuisi kuun katveessa. Kuitenkin ohjelman aikana tietokoneen rooli muuttui, sillä esimerkiksi polttojen ja muiden toimintojen vaatimat laskut päädyttiin tekemään maassa. Tämä vähensi tietokoneen autonomia hyvin paljon, mutta se kykeni kuitenkin ohjaamaan aluksen takaisin maahan, jos yhteys maahan kadotettaisiin kokonaan. Tietokoneen rooli ei kuitenkaan rajoittunut pelkästään aluksen ohjaamiseen, vaan se ohjasi aluksen navigointi- ja muita järjestelmiä.

Kun kuuhun laskeutumisen tavaksi valittiin kohtaaminen kuun kiertoradalla, tuli selväksi, että tarvitaan enemmän kuin yksi tietokone. Tällöin päädyttiin sijoittamaan sekä komentomoduuliin(Command Module, CM), että kuumoduuliin (Lunar Excursion Module, LEM, myöhemmin vain Lunar Module) omat tietokoneensa.

Elokuussa 1961 NASA valitsi MIT Instrumentation Lab:n tietokoneen ja sen ohjelmien tekijäksi. Tähän päätökseen vaikutti osaltaan se, että MIT:llä oli suuri rooli Polaris-ohjusten ohjausjärjestelmien kanssa eli he pystyivät rakentamaan koneita, joille asetettiin paino, tila ja aikavaatimuksia. Kuitenkin Apollo-ohjelman vaatimukset elivät hyvin paljon ja vasta 1962 MIT:llä alkoi olla kunnollinen kuva vaatimuksista. On myös todettu, että jos lopulliset vaatimukset olisivat olleet tiedossa vuonna 1961, ohjelmaa olisi pidetty mahdottomana toteuttaa sen aikaisella teknologialla. Koneen rakentajaksi valittiin Raytheon, sillä myös heillä oli kokemusta Polaris-ohjuksista.

Lopulta Apollo-lennoilla oli neljä tietokonetta, sekä komento- ja kuumoduuleissa oli omat AGC:nsä (Apollo Guidance Computer,) kuumoduulissa oli myös TRW:n tekemä AGS (Abort Guidance System) sekä Saturn-kantoraketissa oli IBM:n tekemä ohjaustietokone.

2 Ohjaus ja navigointijärjestelmä

Apollo-lentojen ensisijainen ohjaus- ja navigointijärjestelmä PGNCS (Primary Guidance, Navigation and Control System) koostui kolmesta osasta, IMU:sta (Inertial Measurement Unit,) optisesta järjestelmästä ja itse AGC-tietokoneesta. Sekä komentomoduulissa ja kuumoduulissa oli omat PNGCS-järjestelmänsä, jotka toimivat hieman eri tavalla.

Vaikka järjestelmän nimi viittaakin sen olevan pääjärjestelmä, todellisuudessa aluksen sijainnin tiedot laskettiin maassa NASAn seurantajärjestelmän pohjalta, jotka sitten astronautit syöttivät AGC:lle. Järjestelmä huolehti kuitenkin aluksen asennosta sekä kuuhun laskeutumisesta, mitä ei voitu hoitaa maasta saatavien tietojen pohjalta.

Inertiaaliohjausjärjestelmä IMU tarkkaili aluksen asentoa ja kiihtyvyyttä gyroskooppien ja kiihtyvyyssensorien avulla. Se koostui kolmesta gimbaalista, joista keskimmäinen pidettiin suunnattuna oikeaan tähteen servojen avulla. Tämä järjestelmä ei kuitenkaan ollut täysin vakaa, joten se piti kalibroida tietyin aikavälein.

Komentomoduulin optinen järjestelmä koostui sekstantista, jolla mitattiin käsin eri tähtien, maan ja kuun asentoa alukseen nähden. Tämän avulla pystyttiin määrittelemään aluksen asento ja sijainti avaruudessa.

Kuumoduulin järjestelmä koostui optisesta asentoteleskoopista (Optical Alignment Telescope.) Se oli huomattavasti rajoittuneempi järjestelmä, jolla pystyttiin vain määrittelemään kuumoduulin asento.

3 Apollo-ohjaustietokone

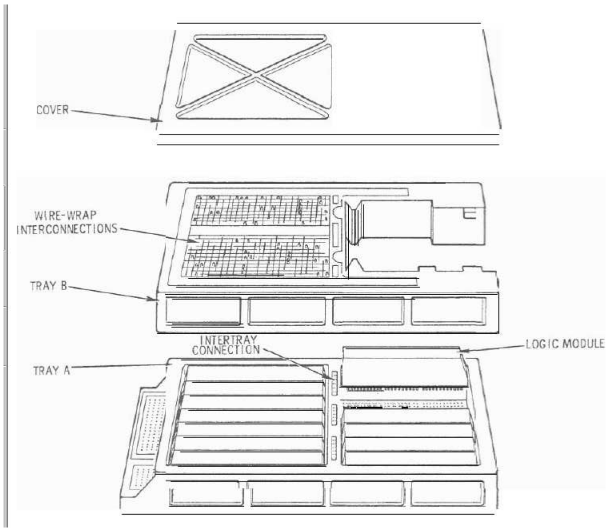
AGC:lle asetettiin suuret vaatimukset jo suunnittelun alkuvaiheessa ja ne kasvoivat ajan mittaan yhä vaativimmiksi. Jos valmiin AGC:n ominaisuudet olisi esitetty 1960-luvun alussa, koko projekti olisi kaatunut niiden mahdottomuuteen. Alussa kuitenkin vaatimukset olivat pienemmät, joten projektin pystyi käynnistymään.

AGC:stä oli kaksi mallia, Block I ja Block II. Block I oli alustavien vaatimusten pohjalta rakennettu kone, jonka suunnittelussa käytettiin paljon Polaris-ohjuksessa käytettyä arkkitehtuuria. Block II alettiin suunnitella 1966, ja se korjasi monta Block I:n puutetta säilyttäen kuitenkin sen perusrakenteen. Se ei kuitenkaan ehtinyt valmistua ennen ensimmäisiä lentoja, joten miehittämättömillä lennoilla käytettiin Block

I konetta.

Eräs tärkeä vaatimus oli paino. Block II:n alkuperäinen runko oli tehty alumiinista, mutta sen todettiin olevan liian raskas ja se korvattiin magnesiumista tehdyllä. Tästä taas seurasi ongelma magnesiumin korroosion kanssa, joka vaati suojaavan pinnoitteen.

Yksi suuri huoli oli suunnittelun alkuvaiheessa rikkoontuvat osat. Tämän johdosta Block I rakennettiin vaihdettavista moduuleista, jotka voitiin vaihtaa osan rikkoontuessa. Kuitenkin viimeisellä Mercury-lennolla vuonna 1963 aluksen tietokone lakkasi toimimasta ja astronautti Gordon Cooper joutui ohjaamaan viimeiset kolme kierrosta maan ympäri käsin. Vian todettiin johtuvan hytissä olleen suuren kosteuden ja ihmisen aiheuttamasta korroosiosta tietokoneen liittimille. Suojaus tätä vastaan olisi painanut liikaa, joten kesken lennon vaihdettavista moduuleista luovuttiin Block II mallissa. Tämän lisäksi laskut osoittivat, että Block I:n vikaantumisväli oli noin 4,200 tuntia [Tom88], joten korjausmahdollisuudesta luovuttiin. Block II osoittautui erittäin kestäväksi tietokoneeksi, eikä yksikään niistä hajonnut lennon aikana, vaikka aluksiin osui salamia Apollo 12 laukaisun yhteydessä ja Apollo 13 lennolla tietokone oli monta päivää täysin sammutettuna ja jäätyneenä.



Kuva 1: Block II rakenne. [Hal66]

3.1 Rakenne

Komentomoduulin (Command Module Computer, CMC) ja kuumoduulin (LGC) tietokoneet olivat periaatteessa täysin samat koneet, mutta ne erosivat jossain mää-

Ominaisuus	Block I	Block II
Sanan pituus	15 bittiä + pariteetti	15 bittiä + pariteetti
Numerojärjestelmä	Yhden komplementti	Yhden komplementti
Kiinteä muisti	24 576 sanaa	36 864 sanaa
Muuttuva muisti	1024 sanaa	2048 sanaa
Muistisykli	11,7 μsec	11,7 μsec
Mikrosiruja	4100	5600
Laskurin kasvatusaika	11,7 μsec	11,7 μsec
Lisäyksen vaatima aika	23,4 μsec	23,4 μsec
Kertomisen vaatima aika	11,7 μsec	11,7 μsec
Kaksinkertaisen tarkkuus	aliohjelma 1.65msec	35,1 μsec
Koko	1.21 kuutiojalkaa	0,97 kuutiojalkaa
Paino	39,4 Kg	29,5 Kg
Virrankulutus	100W	70W

Taulukko 1: Block I ja II ominaisuudet [Hal66]

rin moduuleiltaan. Kuitenkin kumpikin kone pystyttiin muuntamaan toiseksi käyttämällä sopivia moduuleita. Samalla ne olivat siinä mielessä harvinaiset osat Apollo-lennolla sillä sekä komentomoduuli, että kuumoduuli käyttivät samoja Raytheonin rakentamia tietokoneita. Muuten komentomoduuli oli Northern Americanin rakentama ja kuumoduuli Grummanin, eivätkä niiden osat olleet yhteensopivia.

Tietokonetta suunniteltaessa tehtiin omana aikanaan hyvin rohkea päätös käyttää mikrosiruja (Integrated Circuits, IC) tietokoneen rakentamiseen. 60-luvun alussa näitä siruja pidettiin kuitenkin epävarmoina ja niiden valintaa riskitekijänä. Se oli kuitenkin käytännössä pakko tehdä, jotta tietokoneen koko saataisiin tarpeeksi pieneksi. Block I käytti noin 4100 sirua ja Block II 5600 sirua ja vuoden 1963 kesällä MIT oli tilannut noin 60% Yhdysvaltojen koko mikrosiru tuotannosta [Tom88, Hal72]. Projektin alkuvaiheessa AGC olikin maailman uudenaikaisin tietokone, mutta jo vuonna 1969 kaupalliset tietokoneet olivat jättäneet sen auttamattomasti jälkeensä.

Kumpikin malli oli pakattu yksinkertaisesti kahteen tasoon, joissa oli 24 moduulia. Kuvassa 1 on esitetty tämän mallin kaavakuva. Taso A sisälsi logiikkapiirit, rajapinnat ja virtalähteen. Taso B koostui muistista ja sen ohjauselektroniikasta, erilaisista hälytysmekanismeista sekä 1MHz kellosta. Kaikki osat olivat myös hermeettisesti

Rekisteri	osoite	lyhenne
Akkumulaattori	00000	"A"
Alempi akkumulaattori	000001	"L"
Osoitteen paluurekisteri	000002	"Q"
Muuttuvan tietopankin rekisteri	000003	"EB"
Kiinteän tietopankin rekisteri	000004	"FB"
Seuraava osoite	000005	"Z"
Yhteisrekisteri	000006	"BB"

Taulukko 2: Block II:n tärkeimmät rekisterit [Tom88]

suojattuja.

Taulukosta 1 käy ilmi Block I ja II ominaisuudet sekä eroavuudet.

3.2 Prosessori

AGC:tä suunniteltaessa päädyttiin 16-bitin sanakokoon vaikka samaan aikaan 24 bittiset sanat olivat yleisiä tieteellisissä koneissa [Tom88]. Tähän päätökseen vaikutti 16 bitillä saavutettava suurempi nopeus sekä fyysisesti pienempi koko ja virrankulutus. Näistä 16 bitistä yksi oli pariteettibitti, yksi oli etumerkkibitti ja tietoa varten oli 14 bittiä. Jos haluttiin käyttää suurempaa kuin 14 bitin tarkkuutta, pystyttiin yhdistelemään useita 16 bitin sanoja. Periaatteessa sanakoko oli vain 15 bittiä kun pariteettibitti jätetään pois laskuista.

Käskyt koostuivat 16 bitin sanoista, mistä neljä bittiä muodosti käskyn koodin. Näin muistinosoitukseen jäi käyttöön vain 12 bittiä. Tämä juonsi Block I malliin, missä oli vähemmän muistia. Block II mallissa oli 38K sanan muisti mikä vaatii 16 bittiä muistinosoitukseen, joten muisti oli jaettu tämän takia useaan tietopankkeihin. Näin muistiviittaus pystyttiin hoitamaan tietopankkirekistereillä siten, että ensin ilmoitettiin mihin pankkiin haluttiin viitata ja sitten sen sisäinen osoite.

AGC:llä oli käytössä seitsemän päärekisteriä, mitkä on lueteltu taulukossa 2. Toisin kuin suurin osa muusta tietokoneesta, nämä rekisterit oli toteutettu kiikuilla (flip-flop.)

Näistä muuttuvan muistin rekisteri sisälsi 3 bittiä ja kiinteän muistin 5 bittiä. Näiden rekisterien avulla viitattiin pankkien sisälle suoralla muistinosoituksella. Tämän lisäksi oli käytössä ns. "super bank bit" joka voitiin katenoida osoitteeseen ja näin saatiin vaadittava 16 bitin osoitus aikaan. Tämä rakenne vaati ohjelmoijilta paljon lisätyötä.

AGC sisälsi koon ja painon takia vain yhden lisäyspiirin, joka päivitti seuraavan muistipaikan rekisteriä, muutti annettua osoitetta jne.

3.3 Muistin rakenne

Apollo lennoilla tietokoneen muisti koostui suuremmasta kiinteästä muistista ja pienemmästä uudelleen kirjoitettavasta muistista [Hal66, Tom88]. Kiinteä muisti oli toteutettu niin sanotulla *ydin-köysi*(Core rope) tekniikalla ja uudelleen kirjoitettava muisti oli tehty ferriittirenkailla. Ydin-köysi muistin suuri etu oli sen mahdollistama tiedon suuri tiheys ja kestävyys. Haittapuolina olivat sen vaikea rakentaminen sekä se, että kun se kerran oli valmis, sitä ei käytännössä voitu enää muuttaa. Ferriittirenkailla toteutettu muisti oli taas liian kallis ja fyysiseltä kooltaan liian iso, että sitä olisi voitu käyttää kaikkien ohjelmien tallentamiseen. Samalla sen virrankulutus oli liian suuri. Päätös toteuttaa kiinteä muisti ydin-köysi muistina juonti aikaisempaan miehittämättömään Marsin kuvaus lentoon, minkä aikana se oli todettu toimivaksi tekniikaksi.

Muistin koko oli yksi niitä osa-alueita, mitä NASA ja MIT eivät osanneet arvioida kunnolla projektin aikana. Ensimmäiset suunnitelmat määrittelivät kiinteän muistin kooksi neljä tuhatta sanaa ja uudelleen kirjoitettavan muistin kooksi 256 sanaa. Myöhemmin kiinteä muistin koko kasvoi ensin 10k sanaan, sitten 12k, 24k ja lopulta Block II-mallissa oli 36K sanan kiinteä muisti sekä 2048 sanan muuttuva muisti.

Ferriittirengasmuisti koostuu matriisista ferriittirenkaita, joihin indusoidaan joko myötä- tai vastapäivään kiertävä magneettikenttä, joka vastaa joko nollaa tai ykköstä. Yksi rengas voi siis varastoida yhden bitin verran tietoa. Ydin-köysi muisti käyttää myös ferriittirenkaita, mutta renkaan läpi kulkee jopa 64 johtoa, joilla saadaan aikaan neljä 16-bittistä sanaa. Näin yhden renkaan tieto oli joko yksi bitti tai neljä sanaa. AGC:ssa oli ydin-köysi muistia varten kuusi moduulia, joista jokainen pystyi varastoimaan 6144 16-bittistä sanaa. Nämä moduulit oli jaettu 1024 sanan pankkeihin, joista kahteen ensimmäiseen pystyttiin viittaamaan suoraan.

Tämä Core-rope muisti oli hyvin kestävää, sillä kun Apollo 12 laukaistiin Kennedyn avaruuskeskuksesta, rakettiin iski kaksi salamaa, jotka seurasivat raketin jättämää vanaa aina laukaisutorniin saakka. Tämä aiheutti pisimmän listan virheilmoituksia, mitä oli koskaan nähty laukaisujen yhteydessä. Nämä salamat eivät kuitenkaan rikkoneet itse kiinteää muistia, vaikka lyhytaikaisen muistin tietoja menetettiinkin. Myöskään tietokone ei vaurioitunut tämän yhteydessä.

3.4 Väylät

AGC käytti tiedon siirtoon kahta 16 bittistä väylää, luku- ja kirjoitus väylää. Rekistereiden tieto voitiin siirtää kontrollisignaalilla lukuväylälle, joka oli myös yhteydessä kirjoitusväylään. Näin luettu tieto löytyi myös kirjoitusväylältä. Väylille pystyttiin siirtämään kerralla useampien rekistereiden tietoja kerralla, jolloin käytettiin XOR-operaatiota niitten tietojen siirtämiseen väylälle.

4 Ohjelmisto

4.1 Käyttöjärjestelmän arkkitehtuuri

AGC käytti prioriteetti-keskeytys järjestelmää, minkä avulla se pystyi suorittamaan useaa työtä kerralla. Sillä oli kaksi suoritusjonoa, Executive ja Waitlist. Waitlist oli yhdeksän tehtävän jono, jonka jokaisen tehtävän maksimiaika oli neljä millisekuntia. Executive-jono oli seitsemän maksimissaan yhdeksän millisekuntia kestävien töiden jono. Jos tehtävä kesti pitempään kuin neljä millisekuntia, se ylennettiin “työksi” ja siirrettiin Executiven suoritettavaksi. Executive tarkisti 20ms välein oliko vuorossa kiireellisempiä töitä kuin sillä hetkellä suorituksessa olevat ja siirsi ne suoritukseen. Se hoiti myös DSKY:n päivittämistä sekä muistin hallintaa.

AGC:llä oli myös mahdollisuus tiputtaa tehtäviä ja töitä ylikuormituksen sattuessa. Tällöin se pyrki pudottamaan mahdollisimman alhaisen prioriteetin tehtäviä. Tämä ominaisuus oli hyvin tärkeässä osassa Apollo 11 lennolla, sillä kun "Kotka"oli laskeutumassa kuuhun, oli lähestymistutka väärässä tilassa, mikä aiheutti 15% menetyksen AGC:n tehossa. AGC pystyi kuitenkin tiputtamaan vähemmän tärkeitä töitä ja jopa käynnistymään turvallisesti uudelleen.

Koska AGC:llä oli hyvin vähän muuttuvaa muistia, millään ohjelmalla ei ollut vakituista paikkaa muistissa. Muisti oli toteutettu aikajaettuna (time-shared,) jolloin Executive antoi kulloinkin suorituksessa olevalle ohjelmalle yhden muistin 12 ydinjoukosta (core-set.) Tämä päätös jakaa muisti aiheutti paljon ongelmia ohjelmoijille, sillä varmistuakseen siitä, että kaksi ohjelmaa ei koskaan käyttäisi samaa muistialuetta yhtä aikaa oli vaikea tarkistaa.

4.2 Ohjelmistot

Hyvin yleinen tapa Apollo-ohjelman aikana oli sysätä raudan aiheuttamia ongelmia ohjelmiston huoleksi. Tämä lisäsi huomattavasti ohjelmoijien taakka, sillä jo Block I ja II vaativat omat ohjelmansa, miehittämättömät ja miehitetyt omansa sekä molemmat moduulit omansa. Vaadittavien ohjelmien määrä ja koko kasvoi, ja pahimmillaan niiden koko ylitti 11K sanalla käytettävissä olevan muistin määrän. Tämän takia ohjelmistoja karsittiin säilyttäen kuitenkin kyvyn palata itsenäisesti maahan. Itse ohjelmistokokonaisuuksia oli useita eri tehtäviä ja lentoja varten, kuten SUNDISK, SUNBURST, mutta ensimmäistä kuun kiertoradalle menevää Apollo 8 -lentoa varten päätettiin käyttää komentomoduulissa COLOSSUS-ohjelmistoa. Apollo 11 kuumoduuli käytti LUMINARY-nimistä ohjelmistoa kuuhun laskeutumista varten.

Suuri ongelma varsinkin ohjelman alkupuolella oli ohjelmistojen puutteellinen testaus, integrointi ja dokumentointi. Käytännössä ainoa Apollo 11:sta ohjelmiston dokumentti oli ohjelmakoodi itse. Ohjelmat sisälsivät myös hyvin paljon virheitä, joiden olemassaolo tiedettiin mutta niiden paikkaa ei. Niiden korjaaminen lennosta oli myös käytännössä mahdotonta, sillä kiinteän muistin rakenteen takia niitä ei voitu korjata.

Nämä ongelmat aiheuttivat miehittämättömillä lennoilla jopa 350km virheen laskeutumisissa, ennenaikaisia moottorin sammutuksia sekä Apollo 11 lennolla laskeutumisen aikana tietokoneen ylikuormittumisen.

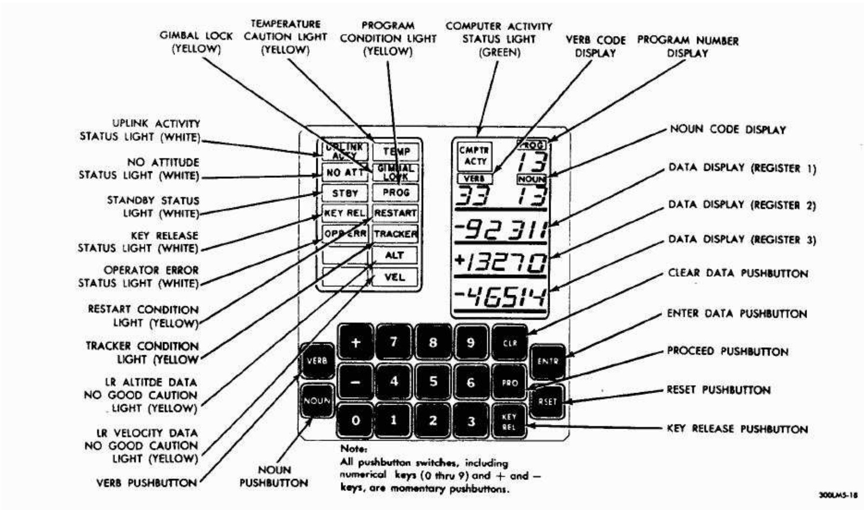
5 DSKY

Komentomoduulin ja kuumoduulin tietokoneiden ohjaamiseen tarvittiin niin kutsutut DSKY-konsolit (Display Keyboard). Kuvassa 2 on kuumoduulissa käytetyn DSKY:n kaavio. Näitä konsoleita oli sijoitettu kaksi komentomoduuliin, toinen komentajan istuimen eteen ja toinen oli navigointipisteessä komentomoduulin alemmassa tarviketilassa, minne myös itse AGC oli sijoitettu, sekä yksi kuumoduuliin astronauttien väliin. Kuulento vaati kokonaisuudessaan noin 10500 näppäinten painallusta vaikka suunnittelijat pyrkivätkin vähentämään painalluksia. Vaikka DSKY:t olivat suunniteltu toimimaan tietokoneiden osina, ne olivat kuitenkin fyysisesti erillään itse koneista.

Käskyt syötettiin verbi-substantiivi (verb-noun) pareina. Verbit olivat kaksinumeroisia oktaalikoodeja, jotka määrittelivät mitä astronautti halusi seuraavaksi tapahtuvan. Näihin toimintoihin kuuluu tietojen hakeminen muistista tai laitteilta, tiedon lataamisen, operaatioiden hyväksymisen ja ohjelmien lataaminen. Myös substantiivit olivat kaksinumeroisia operaattorikoodeja. Yleensä ne viittasivat johonkin muuttuvan muistin rekisteriin kuten järjestelmän kelloon tai muistipaikkaan. Kaikki toiminta käyttäjän ja tietokoneen välillä tapahtui näillä koodeilla.

Itse käskyt syötettiin 19 näppäimisellä näppäimistöllä, joka sisälsi numerot 0-9, + ja - merkit, verbi ja substantiivinapit sekä muita apunäppäimiä. Kaikki toiminnot oli myös suunniteltu siten, että vain yhtä nappia kerrallaan painettiin.

Kun astronautti syötti käskyn, hän näppäili ensin V <koodi> N <koodi> ENTER eli esimerkiksi V16N36E. Verbit ovat käskyjä itse tietokoneelle ja kattavat operaatioita aina tiedon lataamisesta tietokoneen päätilan muuttamiseen.



Kuva 2: Block II kuumoduulin DSKY [Hal72].

Näppäimet:

- VERB Tämä näppäin kertoi tietokeelle, että seuraavaksi se saa verbin koodin.
- NOUN Tämä näppäin kertoi tietokoneelle, että seuraavaksi se saa substantiivin koodin.
- 0-9 Näillä numeroilla syötettiin verbien ja substantiivien koodit sekä muut arvot.
- + / - Kun näitä näppäimiä käytettiin arvojen syötössä, ne syötettiin desimaaliarvoina, muuten ne syötettiin oktaaleina.

- CLR - CLEAR, tällä napilla puhdistettiin sen hetkisen rekisterin arvo syöttämällä siihen nollia.
- PRO - PROCEED, tämä antoi tietokoneelle luvan jatkaa toimintaa.
- KEY REL - KEY RELEASE, tällä napilla annettiin tietokoneelle lupa ottaa DSKY hallintaansa esimerkiksi muuttuvan tiedon näyttämistä varten.
- ENTR - ENTER
- RSET - RESET,

DSKY:n varoitusvalot ja niiden merkitys:

- CMPT ACTY - Paloi kun tietokone suoritti ohejelmaa.
- UPLINK ACTY - Paloi kun tietokone vastaanotti tietoa maasta.
- TEMP - Lämpötilan varoitusvalo.
- NO ATT - Paloi kun inertiajärjestelmä ei pystynyt määrittelemään aluksen asentoa.
- GIMBAL LOCK - Paloi kun keskimmäisen gimbaalin IIII kulma oli yli 70 astetta.
- STBY - Paloi kun tietokone oli standby-tilassa.
- PROG - Paloi kun tietokone odotti käyttäjältä lisää tietoa ohjelman suorittamiseksi.
- KEY REL - Paloi kun tietokone tarvitsi DSKYn kontrollia ohjelmaa varten.
- RESTART - Tämä valo paloi kun tietokone käynnistyi uudelleen.
- OPR ERR - Ilmoitus virheellisestä komennosta.
- TRACKER - Paloi kun optinen järjestelmä ei toiminut.
- NO DAP - (vain kuumoduuli)
- ALT - Korkeuden varoitusvalo (vain kuumoduuli)
- VEL - Nopeuden varoitusvalo (vain kuumoduuli)

DSKY sisälsi seitsemän näyttöä, jotka olivat seuraavat:

- PROG - Kaksinumeroinen luku, jossa oli sen hetkisen ohjelman numero
- VERB - Kaksinumeroinen luku, missä näkyi syötettävän verbin koodi
- NOUN - Kaksinumeroinen luku, missä näkyi syötettävän substantiivin koodi
- Kolme viisinumeroista kenttää, jotka näyttivät numeroita joko desimaali- tai oktaalijärjestelmässä. Jos näytössä oli etumerkki, kyseessä oli desimaaliluku.

Vaikka tämä käyttöliittymä sisälsi 19 näppäintä eikä ollenkaan aakkosia, verbi-substantiivipareja oli yli 100 ja noin 70 ohjelmaa, tätä käyttöliittymää pidettiin helppona käyttää ja sitä verrattiin pianon soittamiseen. Koska astronautit joutuivat käyttämään hyvin paljon aikaa simulaattoreissa, suurin osa pystyi käyttämään DSKY:tä hyvin nopeasti vähäisillä virheillä [Tom88].

6 Abort Guidance System

Apollo lennoilla oli myös mukana kolmas tietokone, TRW:n suunnittelema AGS (Abort Guidance System) [Tom88]. Se oli huomattavasti heikkotehoisempi kuin AGS ja se pystyi huolehtimaan vain kuulaskeutumisen aikana tapahtuneesta keskeytyksesta sekä paluusta maan kiertoradalle. Se ei kuitenkaan pystynyt hoitamaan laskeutumista. Tätä tietokonetta ei käytetty kertaakaan apollo-lentojen aikana, vaikka se näyttelikin pientä osaa Apollo 10 lennolla [Apo69]. Tällä lennolla oli tarkoitus laskeutua lähelle kuunpintaa kuumoduulilla. Kun lähestyttiin tehtävän sitä osaa, mikä simuloi kuusta lähtöä, oli AGS “CM pointing” tilassa. Tämän takia AGS otti laskeutumisosasta irroittautumisen jälkeen nousuosan haltuunsa ja käänsi sen osoittamaan komentomoduulia. Tämän ei pitänyt tapahtua, mutta AGS toimi niin kuin se oli suunniteltu.

7 Yhteenveto

Apollo-ohjelman alussa tuskin uskottiin, kuinka toimivan ja varman tietokoneen kuualukset tulisivat sisältämään. Jo pelkästään yli 4000 tunnin vikaantumisväli oli poikkeuksellinen sen aikaisissa järjestelmissä. Kuitenkin konetta sanottiin liian hitaaksi ja samaan aikaan käytössä olleet PDP-11 minitietokoneet olivat kertaluokkaa nopeampia. Ne eivät kuitenkaan olisi kestäneet samoja olosuhteita, mitä AGC joutui kestämään. Apollo-lentojen jälkeen AGC:tä käytettiin kolmella lennolla Skylab-avaruuslaboratorioon sekä historiallisella Apollo-Soyuz kohtaamisessa. Sitä käytettiin myös fly-by-wire-tekniikan testaamisessa F-8 testikoneessa.

Myös ohjelmointipuolella NASA ja MIT saivat paljon kokemusta AGC:stä. Tätä ennen NASAlla ei ollut paljoa kokemusta näin suurista projekteista. Kun Apollo 1 tuhoutui tulipalossa, aluksessa olleen Block I tietokoneen ohjelmistot olivat auttamattoman keskeneräiset. Tulipaloa seuranneiden kuukausien aikana muutettiin ohjelmiston kehitystä sellaiseksi, että ohjelmat toimitettiin mahdollisimman valmiina eikä silloin, kun koneiden tekijät sanoivat.

Lähteet

Hal66 Hall, E., Case History of the Apollo Guidance Computer, June 1966. http://hrst.mit.edu/hrs/apollo/public/archive/1675.pdf. [21.3.2006]

Hal72 Hall, E., MIT's role in project Apollo, Elokuu 1972. http://klabs.org/history/history_docs/mit_docs/1029.pdf. [21.3.2006]

Apo69 NASA, Apollo 10 mission report, 1969. http://history.nasa.gov/alsj/a410/A10_MissionReport.pdf. [21.3.2006]

Tom88 Tomayko, J., Computers in Spaceflight - The NASA Experience, 1988. http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/computers/Compspace.html. [21.3.2006]