

GEOMETRIAN MALLINTAMINEN - UUSI TUTKIMUSALUE

Antero Katainen

Rakenteiden Mekaniikka Vol 14
No. 4 1981 s. 1...11

YHTEENVETO: Yksi tietokoneavusteisen suunnittelun sekä osittain valmistuksen tärkeimmistä tehtävistä on hallita fyysisten kappaleiden geometria. Tällä alalla on suoritettujen tutkimusten ja tutkimuspanosten määrä kasvanut voimakkaasti. Aiheesta on alettu käyttää nimitystä geometrinen mallintaminen (Geometric modelling). Oheisessa artikkelissa on lyhyt katsaus alueen ongelmiin ja käytettyihin ratkaisumalleihin. Mallintamistekniikan menetelmiä käsitellään esimerkein ja lyhyin selostuksin. Yhteispohjoismainen geometrinen mallintamisprojekti (GPM) esitetään pääpiirteissään.

GEOMETRINEN MALLINTAMINEN

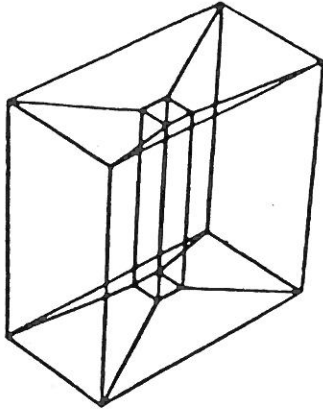
Käsitteenä geometrinen mallintaminen on moniselitteinen vaihdellen jonkin verran eri kirjoittajien välillä /1-10/. Käsitteen ominaispiirteitä on:

- se käsittää kolmiulotteisten fyysisten kappaleiden kuvaamista ja ahtaasti tulkittuna ns. "rautalankamalleja" ei lueta tähän
- mallintamisella tarkoitetaan tietokoneella tapahtuvaa työskentelyä mallin kanssa
- mekaanisessa suunnittelussa mallintaminen on lähinnä CAD/CAM-järjestelmän osa, jolla hallitaan kuvattavan kappaleen geometria.

RAUTALANKAMALLI/VOLYYMIMALLI

Kaupallisissa CAD-järjestelmissä käytetään nykyisin lähes poikkeuksetta mallin esittämiseen ns. rautalankamalleja (Wire-model). Näille on tyypillistä, että kuvattava kolmiulotteinen kohde esitetään avaruudessa kulkevinä särminä.

Kolmiulotteisen kappaleen malli on usein vain kolmen tai useamman kaksikulotteisen kuvannon joukko. Itse kappaleen pinnoista ei ole tietoa miten ne sijaitsevat sekä ennen kaikkea materiaalin sijainti näiden pintojen suhteen ei ole yksikäsitteinen. Tästä seuraa, että mallin täydellinen hyödyntäminen kuten lujuuden, painon, hitausmomenttien jne. laskemiseksi vaaditaan lisäinformaatiota. Myös teknillisissä piirustuksissa tarvittava piiloviivojen poisto vaatii tiedon materiaalin sijainnista kappaleessa kuten kuvasta 1 nähdään.

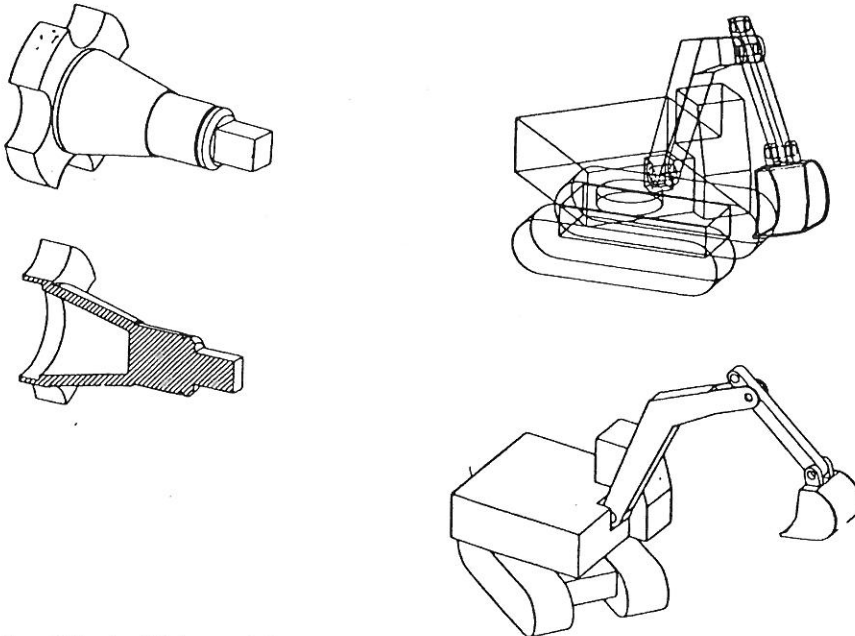


Kuva 1. Klassillinen esimerkki kolmiulotteisesta lankamallista, joka ei ole yksikäsitteinen. Kuinka materiaali sijaitsee kuvan kappaleessa?

Rautalankamallia kehittyneemmälle mallintamismenetelmälle käytetään nimeä volyymigeometria (Volume Geometry; Solids Geometry). Geometrisen mallintamisen tämän päivän tutkimus kehittää menetelmiä juuri volyymigeometrian alueelta.

Volyymigeometriassa voidaan poistaa lankamallin heikkoudet; tosin tulokset on saatu monimutkaistamalla ohjelmia sekä tinkimällä laskentanopeudesta. Volyymimalleja haittaa niiden rajoittuneisuus: Tiettyä geometrasta muotoa ei voida kuvata tai kappaleen yksityiskohtia on niin runsaasti, että käytettävissä oleva muisti ei riitä tai laskenta-aika kohoaa liialliseksi.

Lähes kaikki hyväksyvät ajatuksen, että volyymigeometria on tulevaisuuden mallintamismenetelmä. Tietokoneiden nopeus ja muistikapasiteetti kasvavat jatkuvasti hintojen suhteellisesti laskiessa. Lisäksi tutkimus tuottaa parempia ratkaisumenetelmiä - uusia järjestelmiä ja menetelmiä kehitetään vaikeuksien voittamiseksi. Kuvassa 2 on muutama esimerkki piirroksista, jotka on laadittu volyymigeometrisen mallintamisen avulla.



Kuva 2. Täydellisestä volyymimallista voidaan tutkia yksittäisiä leikkauksia samoin kuin poistaa hahmottamista häiritsevät piiloviivat automaattisesti.

Seuraavassa esitellään vain volyymigeometrisia mallintamismenetelmiä, koska rautalankamallien osalta on tärkeimmät tavoitteet saavutettu ja kehitys alalla tapahtuu volyymigeometrian suuntaan.

PUOLIAVARUUSMALLI/RAJAPINTAMALLI

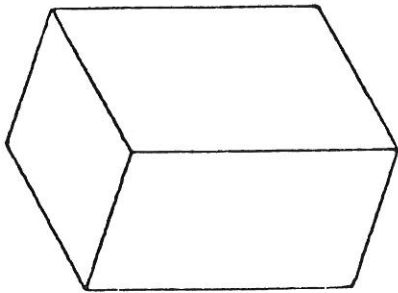
Nykyisin käytössä olevat volyymigeometriset mallintamismenetelmät voidaan jakaa periaatteellisen toimintansa perusteella kahteen eri ryhmään: puoliavaruusmallit ja rajapintamallit.

Puoliavaruusmallissa (Half-space model) esitetään kappale joukolla epäyhtälöitä. Esimerkiksi pallo voidaan esittää epäyhtälöllä:

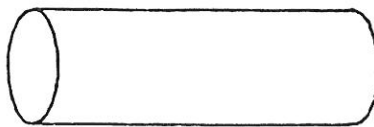
$$x^2 + y^2 + z^2 < r^2$$

eli em. yhtälö on tosi pallon sisäpuolella ja epätosi muualla.

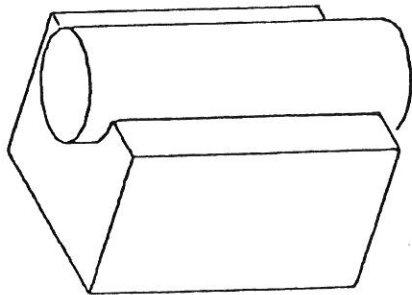
Itse kappale voidaan kuvata yhdistämällä joukko-opillisesti erilaisia peruskappaleita, joista kukin on kuvattu joko yhdellä tai useammalla epäyhtälöllä. Kuvassa 3 on esitetty kuinka joukko-opin operaatioilla voidaan kuvata kappaleen rakenne. Ohjelma koostuu tällöin funktiojoukoista, joiden paramet-



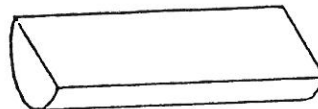
Peruskappale A



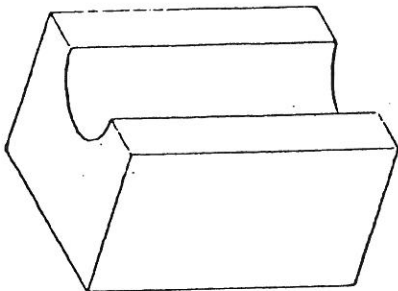
Peruskappale B



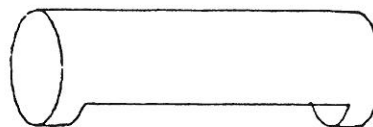
(A union B)



(A leikkaus B)



(A erotus B)



(B erotus A)

Kuva 3. Kappaleen kuvaaminen joukko-opin operaatioilla. Kahdesta peruskappaleesta saadaan neljä eri yhdistelmätyyppiä käyttämällä joukko-opin operaatiota union, leikkaus ja erotus.

reina ovat kunkin peruskappaleen mitat sekä paikkakoordinaatit x , y ja z . Sijoittamalla ohjelmaan muutama silmukka ja ehdollinen lause, voidaan laatia ohjelmamoduuli, joka kertoo onko jokin piste x , y , z useasta peruskappaleesta koostuvan kappaleen sisällä vai ulkopuolella. Ongelmana on kehittää algoritmi, joka tästä informaatiosta löytää kappaleen esittämiseen tarvittavat viivat tai värjää tahi sävyttää sen pinnat halutulla tavalla.

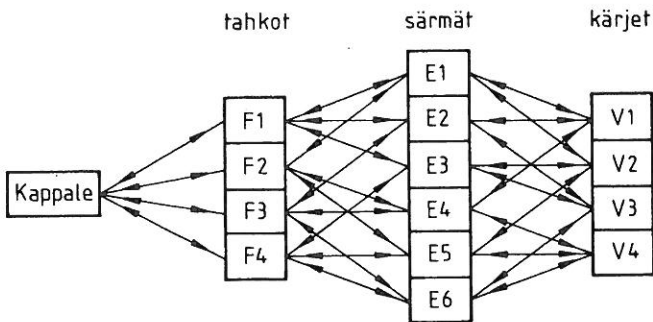
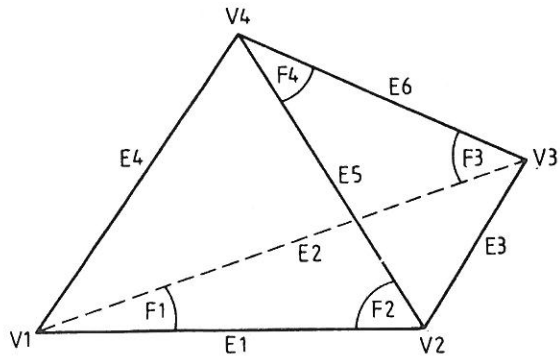
Puoliavaruusmallintamismenetelmiä ovat mm. TIPS (University of Hokkaido) /11/, PADL (University of Rochester) /12/ sekä VTT:ssä GPM-projektin yhteydessä kehitetty GFACE-ohjelmisto /13/.

Rajapinta (Boundary Presentation) volyymimallissa kuvataan rajoittavien pintojen avulla siten, että kullekin kappaleen pinnalle on yhtälö tietokoneessa. Lisäksi pinnan normaalin suunta täytyy esittää materiaalin sijainnin selvittämiseksi. Rajapintamallissa on tarpeellista tallettaa kappaleen topologiset yksiköt kuten tahkot (face), särmät (edge) ja kärjet (vertex) sisäisesti hierarkisina yksikköinä. Hierarkia on välttämätön, koska pinnan matemaattinen yhtälö ei anna tietoa, kuinka ja miten kukin pinta rajoittuu. Hierarkia on myös tarpeellinen tehtäessä muutoksia jo suunniteltuun kappaleeseen, koska pienikin muutos yhdessä yksikössä saattaa aiheuttaa muutoksia suuressa joukossa muita yksiköjä, tai jopa muuttaa niiden lukumäärää. Topologisella muodolla ja esitystavalla on huomattava merkitys tietokoneen laskentanopeuteen. Rajapintaesitystapaa käytetään mm. seuraavissa tietokoneohjelmissa: GEOMED (Stanford Univ.) /1/, ROMULUS (Shape Data Ltd.) /14/, BUILD (Univ. Cambridge) /15/, GLIDE (Carnegie-Mellon Univ.) /2/, GMP-VOLUME /7-8/. On myös ohjelmistoja /16-17/, joiden sisäistä rakennetta ei ole julkistettu.

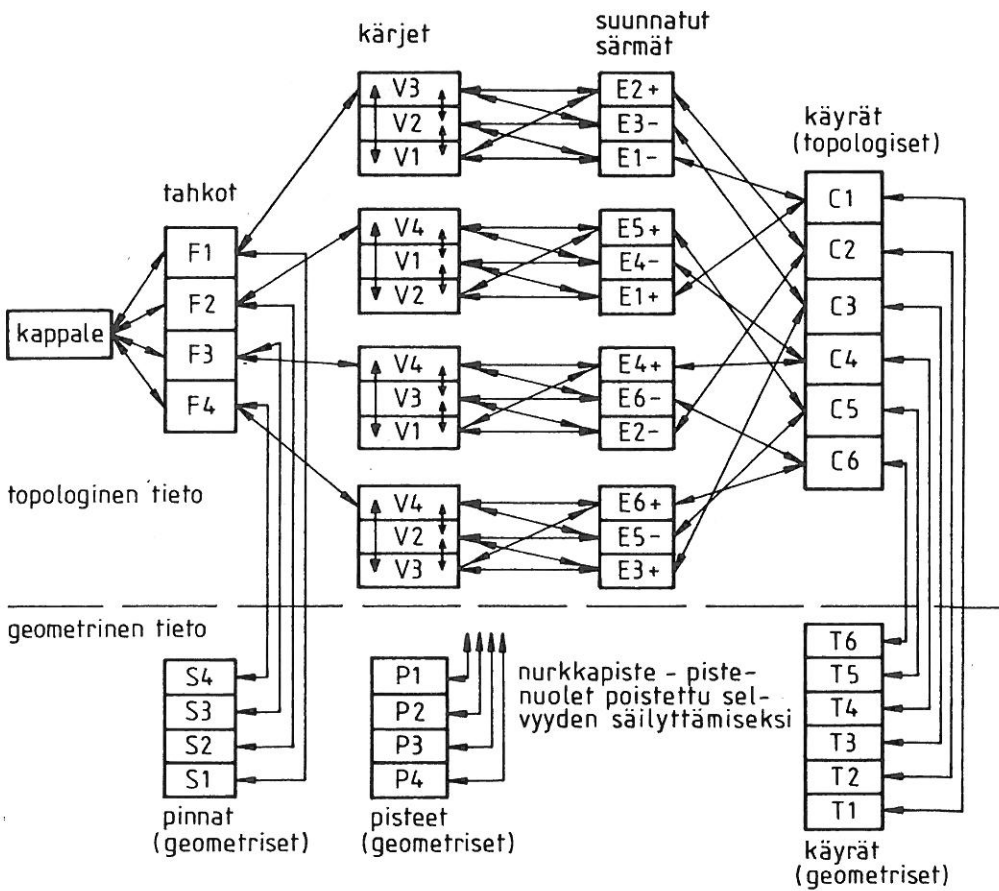
Kuvassa 4 on esimerkki COMPAC-järjestelmän rakenteesta tetraedriä mallinnettaessa. Tetraedri koostuu neljästä tahkosta, joista kukin rajoittuu kolmeen särmään. Kukin tetraedrin särmä taas rajoittuu kahteen kärkeen. COMPAC-ohjelmistossa on rakennettu kuvattavan kappaleen hierarkia siten, että kustakin yksiköstä (tahkosta, särmästä tai kärjestä) on osoitin sitä rajoittaviin yksikköihin. Lisäksi laskennan nopeuttamiseksi tarvitaan jokaiselle osoittimelle palautusosoitin. Kappaleen kuvauksessa COMPAC -mallissa ei geometrista tietoa ole erotettu topologisesta tiedosta.

Kuvassa 5 on sama tetraedri kuvattu ROMULUS-ohjelmistolla. ROMULUS-ohjelmistossa on erotettu topologinen tieto geometrisesta tiedosta. Esimerkiksi yksi särmä esiintyy ROMULUS-mallissa kahteen kertaan - nimittäin molemmissa sen kautta kulkevissa tahkoissa. Kuvan ala-osassa on geometriset yksiköt ja ylä-osassa topologiset yksiköt. Tällainen talletusmuoto vaatii laajahkon muistin mutta toisaalta ohjelman toiminnan kannalta se on tehokas.

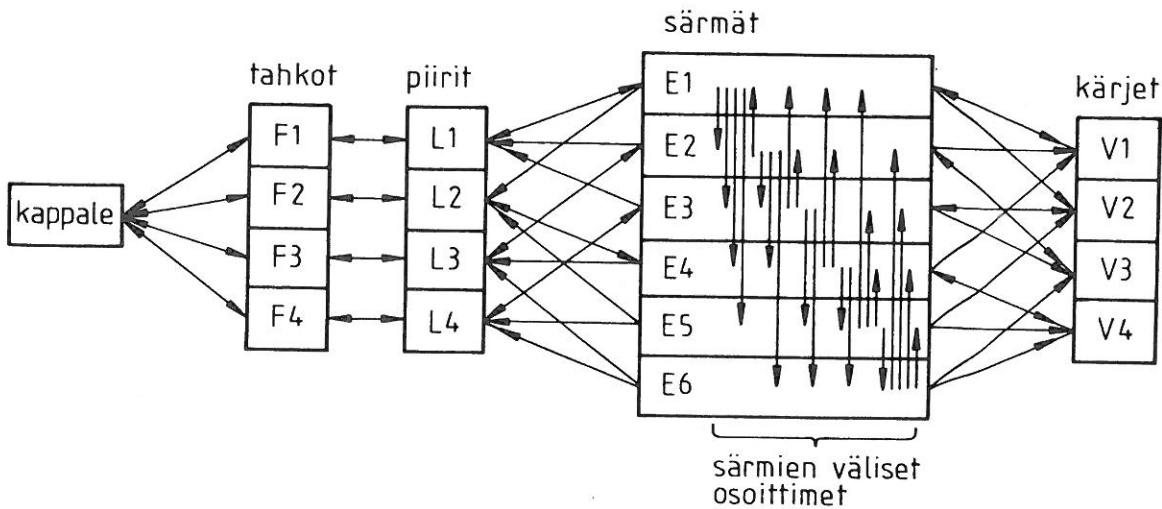
Enhä paras ja eniten käytetty talletusmuoto on ns. "siivekäs-särmä"-rakenne (winged-edge-structure). Tälle muodolle on tyypillistä lisätyt osoittimet eri särmien välillä. Kustakin särmästä päästään kaikkiin sen viereisiin sarmiin suoraan kiertämättä muissa rakenteen yksiköissä. "Siivekäs-särmä"-ra-



Kuva 4. COMPAC-ohjelmiston tietokone-malli tetraedristä. Kukaan nuoli kuvaa osoitinta yksiköstä toiseen.



Kuva 5. Kuvan 4 tetraedri esitettyä ROMULUS-mallina. ROMULUS-mallissa on topologiset yksiköt eristetty geometrisistä yksiköistä.

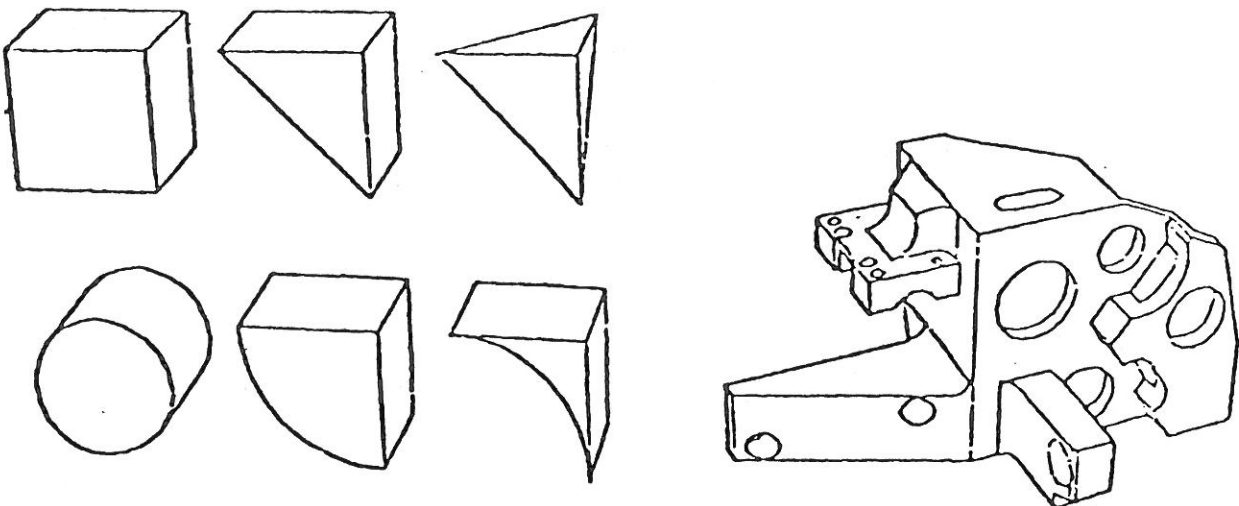


Kuva 6. Tetraedrin malli, jossa viereisten särmien välille on lisätty osoittimet. Rakenteesta käytetään nimitystä "siivekäs-särmä"-rakenne (winged-edge-structure).

kenne mahdollistaa tietokoneella laskennan nopean siirtymisen yksiköstä toiseen ja kuitenkin siinä ei tarvitse tallentaa samaa yksikköä useaan eri paikkaan. Kuvassa 6 on kuvattu tetraedri "siivekäs-särmä"-rakenteena.

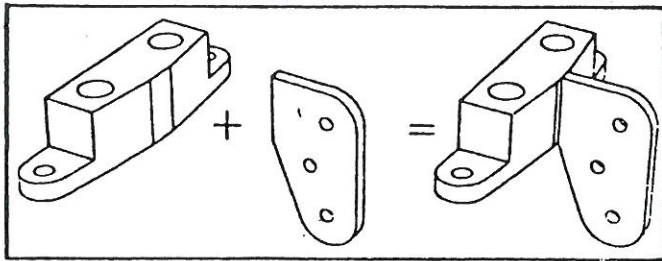
PERUSKAPPALEET/PYYHKÄISYMALLI

Mallin rakenteissa voidaan tavata kahta selvästi toisistaan poikkeavaa muotoa. Toinen tapa on kappaleen kokoaminen joukko-opin operaatiolla peruskappaleista (kuva 7) ja toinen tapa on ns. pyyhkäisytekniikka (Sweeping),



Kuva 7. BUILD-ohjelmiston peruskappaleet ja niistä yhdistelemällä koottu monimutkainen kappale.

jossa kappaleen ääriviivat muodostetaan kaksiulotteisesta joukosta pisteitä ja niitä yhdistävistä käyristä. Tavallisesti käytössä on vain kaksi käyrätyyppiä - suora tai ympyränkaari. Tekemällä tällaisesta käyräjoukosta sulkeutuva joukko sekä määrittelemällä kappaleen paksuus voidaan muodostaa kolmiulotteinen kappale. Tämä käyräjoukko ikäänkuin pyyhkäisee itsensä volyymiksi. Kappale voidaan myös koota useasta pyyhkäistystä osasta kuitenkin tietyin rajoituksin, sillä yhdistettävillä osilla täytyy olla yksi yhteinen pinta. Tällaiselle operaatiolle on annettu kuvaava nimi "liimaaminen" (glue) /14/. Kuvassa 8 on esimerkki pyyhkäisytekniikasta.



Kuva 8. Mallin luominen pyyhkäisytekniikalla. Kappale kootaan kahdesta osasta "liimaamalla". Kappaleen kaksi osaa kuvataan ensiksi kaksiulotteisina ääriviivoina reikineen, jonka jälkeen niille voidaan antaa paksuus.

Joissakin järjestelmissä on käytössä molemmat edellä kuvatut mallin luontitavat. Tosin niiden keskinäiseen yhdistelyyn liittyy monia rajoituksia.

EULER-OPERAATIOT

Kun kuvataan monimutkainen kappale, jossa on paljon pintoja, särmiä ja nurkkapisteitä, on suuri vaara, että kuvattu kappale on fyysisesti mahdoton. Tämän välttämiseksi on lähes kaikissa rajapintamalliin perustuvissa järjestelmissä sisäinen mielekkyystarkistus. Yksi tapa suorittaa tämä on ns. Eulerin operaatiot /18-19/, jotka seuraavat matemaatikko Eulerin yhtälöstä fyysisen kappaleen topologisten yksikköjen välillä. Yksinkertaisimmassa muodossa yhtälö kuuluu

$$F - E + V = 2 ,$$

jossa F on kappaleen pintojen lukumäärä (FACES), E on kappaleen särmien lukumäärä (EDGES) ja V on kappaleen kärkien lukumäärä (VERTICES). Kun kappaletta kootaan tai muutetaan, täytyy yhtälön olla voimassa. Tätä varten on kehitetty Eulerin operaatiot, joita käyttäen yhtälö säilyy koko ajan voimassa. Kunkin operaation jälkeen Eulerin yhtälö on voimassa, mikäli se oli sitä ennen.

Eulerin yhtälön yleisempi muoto on

$$F - E + V - L = 2 \cdot (B - G) ,$$

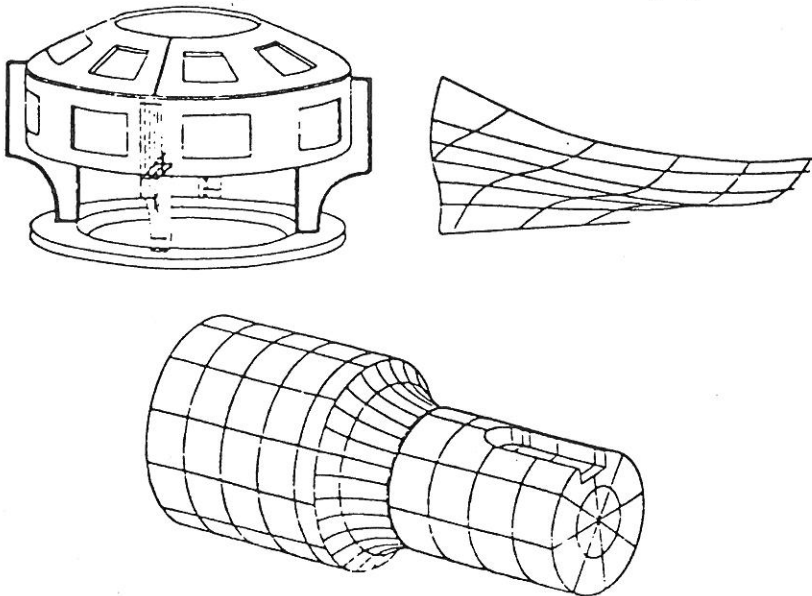
jossa L on sulkeutuvien pintojen lukumäärä (LOOPS), B erillisten kappaleiden lukumäärä (BODYS) ja G kappaleen läpimenevien reikien lukumäärä (GENUS) (esimerkiksi pallon G on nolla, mutta toruksen G on yksi).

Kappaletta kuvaavasta tietokannasta saadaan suureet F, E ja V, mutta suureiden L, B ja G selvittäminen on vaikeaa. Ongelma voidaan kiertää tekemällä Euler-operaatiot sellaisiksi, että ne muuttaessaan kappaleen rakennetta määräävät myös suureiden L-, B- ja G-arvot.

Kaikki kappaleet ovat muodostettavissa viidellä Euler-operaatiolla, mutta yleensä ohjelmistoissa on huomattavasti suurempi määrä operaatiota sekä suorituksen nopeuden parantamiseksi että ohjelmoinnin helpottamiseksi. Operaatio saattaa myös olla usean perusoperaation yhdistelmä.

GPM-PROJEKTI

Vuodesta 1978 lähtien on ollut käynnissä suurehko yhteispohjoismainen mallintamisprojekti nimeltään GPM (Geometric Product Models) /7-8/. Projektin tarkoituksena on tuottaa aliohjelmia teollisuuden tarpeisiin CAD/CAM-ohjelmien laatimiseksi tuotteelle. Projekti on jaettu kolmeen erityyppiseen sovellutukseen, jotka käsittävät kaksoiskaarevia pintoja, yhteenkytkettyjä levyrakenteita ja volyyymigeometriaa. Kuvassa 9 on esitetty tyypilliset kappaleet kustakin sovellutuksesta. Kaksoiskaarevat pinnat tulevat lähinnä kysymykseen telakka-, auto- ja lentokoneteollisuudessa. Yhteenkytkettyjä levyrakenteita käytetään sellaisessa konepajateollisuudessa, jossa tuotteet ovat



Kuva 9. Esimerkkejä GPM-ohjelmiston kolmesta päämoduulista: yhteenkytketyt levyrakenteet, kaksoiskaarevat pinnat ja volyyymigeometria.

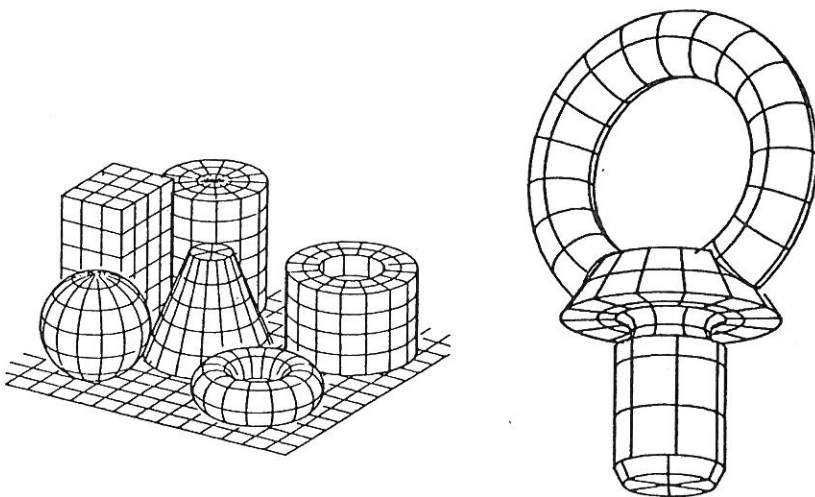
hitsattuja levyrakenteita. Volyyymigeometria palvelee lähinnä sellaista sovellutusaluetta, jossa tuotteet tehdään pääasiassa koneistamalla.

Suomesta on GPM-projektiin osallistunut VTT:n metallilaboratorio ja ATK-palvelutoimisto, jotka ovat kehittäneet volyyymigeometrian ohjelmiston yhteistyössä Ruotsin projektiryhmän kanssa. GPM:n volyyymigeometria perustuu rajapintaesitystapaan, jossa on käytettävissä kuusi peruskappaletta sekä pyyhkäisytekniikka. Ohjelmassa on tällä hetkellä käytettävissä "liimaus"-operaatio, mutta myöhemmin on tarkoitus lisätä muut joukko-opin operaatiot. Tietojen esittämistavassa käytetään modifioitua siivekäs-särmä-rakennetta.

GPM-projektiin on testaustarkoituksessa osallistunut useita teollisuuslaitoksia, joille on laadittu - rinnan pääohjelman kanssa - sovellutusohjelmia ja mallintamisohjelmistoja. Suomesta projektiin on osallistunut Valmet Oy. Projektin jatko-osassa on tarkoitus laajentaa ohjelmiston nykyisiä ominaisuuksia sekä rakentaa liitännät muihin tietokoneohjelmistoihin.

TESTAUSOHJELMISTO GFACE

GPM-projektin yhteydessä on VTT:ssa valmistettu ohjelmisto /13/, jolla pyritään testaamaan geometrista mallintamista ja keräämään kokemusta. Ohjelma on muodostettu GPM-volyyymimoduulista poiketen puoliavaruusperiaatteella. Peruskappaleina siinä on kuusi äärellistä peruskappaletta sekä kaksi ääretöntä kappaletta (kuva 10). Kuhunkin perusvolyyymiin liitetään kappaleen määrit-



Kuva 10. GFACE-ohjelman peruskappaleet ja niillä joukko-opin operaatiota hyväksikäyttäen kuvattu nosto-silmukka.

telyvaiheessa operaattori, joka kertoo peruskappaleen vaikutuksen koko kuvattavaan kappaleeseen. Kappaleen määrittelystä muodostuu tällöin listamainen rakenne.

GFACE-ohjelma sisältää mahdollisuuden havainnollistaa kappaleita monella tavalla jopa värillisillä ja varjostetuilla kuvilla. Ohjelman leikkausalgoritmit on toteutettu numeerisella menetelmällä, jotta ohjelma ei olisi painunut liian suureksi. Piiloviivojen poisto on suoritettu yleisellä numeerisella algoritmilla, joka perustuu mallin määrittelevien epäyhtälöiden hyväksikäyttöön.

GFACE-ohjelmiston erikoisuus on toruksen käyttö peruskappaleena. Toruspinta on hyvin yleinen konepajateknillisissä sovellutuksissa mm. valuisissa ja muottitakeissa. Muissa malleissa ei yleensä ole mahdollisuutta käsitellä torusta sen monimutkaisen matematiikan takia. GFACE-ohjelmassa on matemaattiset vaikeudet ratkaistu käyttäen numeerisia algoritmeja.

LOPPUSANAT

Geometrinen mallintaminen on voimakkaan kehityksen alaisena. Tutkimuskäyttöön on laadittu monia ohjelmistoja, joilla on lupaavia ominaisuuksia, mutta teollisuuskäyttöön soveltuvissa ohjelmistoissa on puutteita ja rajoituksia. Kaikki merkit viittaavat kuitenkin siihen, että täydellinen kolmiulotteinen mallintaminen monipuolisine mahdollisuuksineen on tulossa myös teollisuuskäyttöön suunnittelijan jokapäiväiseksi apuvälineeksi.

Nykyisin kaupallisesti tarjottavat CAD/CAM-järjestelmät perustuvat lähes yksinomaan ns. rautalankamalliin, joka epätäydellisenä mutta silti monilta osiltaan nykyistä suunnittelutyötä ratkaisevasti tehostavana jäänee vielä pitkäksi aikaa elämään tulevien volyyymimallintamisohjelmien rinnalla tai niiden osana.

Tutkimus geometrisen mallintamisen alalla tapahtuu sekä yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa että myös kaupallisissa yrityksissä. Alalla on useita kansainvälisiä yhteistyöprojekteja (kuuluisin on ehkä CAM-I:n Geometric Modelling Project). Projektien mittasuhteet ovat osoittaneet, että Suomen mahdollisuudet päästä mukaan alan kehitykseen riippuvat osallistumisesta kansainvälisiin projekteihin. Osallistumisella taataan uuden tietämyksen siirtyminen Suomen hyödyntämään maamme teollisuutta.

KIRJALLISUUTTA

- [1] Baumgart, B.G., Geometric modelling for computer vision, Stanford 1974, Stanford Artificial Intelligence Lab., STAN-CS-74-463, 137 s.
- [2] Bauer, A., Eastman, C. & Henrion, M., A survey of geometric modeling, Pittsburgh 1977, Institute of Physical Planning, Carnegie-Mellon Univ., Research Report No. 66, 47 s.
- [3] Braid, I.C., Notes a geometric modeller, Cambridge 1980, Univ. of Cambridge, C.A.D Group Document No. 101, 107 s.

- [4] Requicha, A.A.G., Mathematical models of rigid solids objects, Rochester 1977, Production Automation Project, Univ. Rochester, Tech. Memo 28, 44 s.
- [5] Voelcker, H.B. & Requicha, A.A.G., Geometric modelling of mechanical parts and processes, Computer 10 (1977) 12, s. 48-56.
- [6] Requicha, A.A.G., Representations for Rigid Solids: Theory, Methods and Systems, ACM Computing Surveys 12 (1980) 4, s. 437-464.
- [7] Jakobsen, K., ym., Informasjonsstudiet: Sammandrag og Planer, Trondheim 1978, Geometriske produkt modeller projekt. Selskaper for industriell og teknisk forskning ved NTH, Rap. no. 1, 64 s.
- [8] Ulfby, S. ym., Informasjonsstudiet: System- og metodeoversikt, Oslo 1978, Geometriske produkt modeller projekt, Sentralinstitutt for industriell forskning, Rap. no. 2, 265 s.
- [9] Hatvany, J., Newman, W.M. & Sabin, M.A., World survey of computer-aided design, Computer-aided Design 9 (1977) 2, s. 79-97.
- [10] Borgerson, B.R. & Johnson, R.H., Beyond CAD to Computer Aided Engineering, 8th World Computer Congress, Tokyo, 6-9 October 1980, Julk. Manufacturing Data Systems Inc. Ann Arbor, Michigan, USA, 8 s.
- [11] Okino, N. ym., TIPS-1, Sapporo 1978, Institute of Precision Engineering, Hokkaido Univ., 205 s.
- [12] Voelcker, H.B. ym., An Introduction to PADL, Rochester 1974, Production Automation Project, Univ. of Rochester, Tech. Memo 22, 41 s.
- [13] Katainen, A. ym., GFACE User Guide, Espoo 1981, Geometric Product Model Project, State Technical Research Centre of Finland, 25 s.
- [14] "Romulus: Extracts from User's and Programmer's Guide", Shape Data Ltd., Cambridge, England, 39 s.
- [15] Jared, G.M.M., Build User Guide, Cambridge 1979, Univ. of Cambridge, C.A.D. Group Document No. 102, 35 s.
- [16] Wesley, M.A. ym., A Geometric Modeling System for Automated Mechanical Assembly, IBM Journal of Res. and Dev. 24 (1980) 1, s. 64-74.
- [17] Garter, W.A. (toim.), Geometric modelling seminar, Bournemouth, 27-29 November 1979, Computer Aided Manufacturing International Inc., Julk. CAM-I, Document no. P-80-GM-01, 334 s.
- [18] Eastman, C.M. & Weiler, K., Geometric modelling using the Euler operators, Pittsburgh 1979, Institute of Physical Planning, Carnegie-Mellon Univ., Res. rep. no. 78, 12 s.
- [19] Braid, I.C., Hillyard, R.C. & Stroud, I.A., Stepwise construction of polyhedra in geometric modelling, Cambridge 1978, Univ. of Cambridge, C.A.D. Group Document No. 100, 24 s.

Antero Katainen, ins., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Metallilaboratorio