

hyväksymispäivä

arvosana

arvostelija

Kääntäjätekniikan historia ja kehittyminen

Arttu Kilpinen

Helsinki 12.12.2016

Kandidaatintutkielma

HELSINGIN YLIOPISTO

Tietojenkäsittelytieteen laitos

Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Tietojenkäsittelytieteen laitos	
Tekijä — Författare — Author			
Arttu Kilpinen			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Kääntäjätekniikan historia ja kehittyminen			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Tietojenkäsittelytiede			
Työn laji — Arbetets art — Level	Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
Kandidaatintutkielma	12.12.2016	22 sivua	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Symboliset konekielet olivat ensimmäisiä laitteistojen ymmärtämistä konekielistä poikkeavia ohjelmointikieliä. Niiden kääntäjät, assemblykääntäjät, kääntävät symbolisille konekielille kirjoitettuja ohjelmia konekielisiksi ohjelmiksi. Nykyisin käytössä olevat korkean tason ohjelmointikielet kehittivät hiljalleen ja syrjäyttivät symbolisella konekielillä ohjelmoinnin lähes kokonaan.</p> <p>Ensimmäiset kääntäjät tehtiin tarkasti tietylle lähde- ja kohdekielille. Myöhemmin yleistyi käytäntö, jossa käännetään jonkin välikielen kautta. Välikieliä käyttäen kääntäjän rakenne on jaettu välikielen käännöksestä vastaavaan etuosaan sekä konekielen tuottamisesta vastaavaan takaosaan. Välikielten ja ristiinkääntämisen kehitys helpotti myös kääntäjien ketjuttamista uusille laitteistoille.</p> <p>ACM Computing Classification System (CCS): Software and its engineering → software notations and tools → Compilers</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
Historia, Kääntäjät, Symbolinen konekieli, Ohjelmointikielet, Ketjutus, Ristiinkääntäminen, Välikielet			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Additional information			

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Symbolinen konekieli ja assemblykääntäjät	2
2.1	Ensimmäiset assemblykääntäjät	2
2.2	Assemblykääntäjien toiminta	3
3	Historiaa korkean tason kielten kääntäjistä	4
3.1	Täsmällisten kuvausjärjestelmien kehitys	5
3.2	Kohti ensimmäisiä kääntäjiä	6
4	Välikielet ja ristiinkääntäminen	8
4.1	Ristiinkääntäminen	8
4.2	Välikielet	9
5	Kääntäjien kuvaus: T-kaaviot	11
5.1	Alkuperäinen Bratman-kaavio	11
5.2	Earleyn ja Sturginsin merkintätapa	12
6	Kääntäjien rakenne ja ketjutus	14
6.1	Iteratiivinen ketjutus	14
6.2	Ketjutus olemassa olevien kääntäjien avulla	15
6.3	Ketjuttamista helpottava kääntäjä rakenne	17
7	Yhteenveto	20

1 Johdanto

Kääntäjät ovat tietokoneohjelmia, jotka kääntävät lähdekielisen ohjelmakoodin kohdekieliseksi ohjelmaksi (Bauer et al., 1974: 1). Ohjelmointikielet sekä niitä ymmärtävät kääntäjät ja tulkit ovat keskeisessä asemassa ohjelmistotuotannossa. Kääntäjät mahdollistavat ohjelmien kirjoittamisen korkean tason ohjelmointikielillä sekä symbolisilla konekielillä.

Ennen korkean tason ohjelmointikielille kehitettyjä kääntäjiä oli käytössä vain symbolisia konekieliä ymmärtäviä ohjelmia, assemblykääntäjiä. Niiden avulla ohjelmoija kykeni käyttämään tekstuaalisia konekielisiä komentoja laitteiston ymmärtämien binääristen konekäskyjen sijaan. Näin ollen konekielinen ohjelmointi helpottui ja nopeutui. Myöhemmin symbolisten konekielten rinnalle kehittyi korkean tason ohjelmointikieliä. Symbolisista konekielistä poiketen niiden ohjelmointi oli laitteistoriippumaton ja niiden kääntäminen oli huomattavasti monimutkaisempaa.

Korkean tason ohjelmointikielten sekä symbolisten konekielten käyttö helpottavat ja nopeuttavat ohjelmointia. Niiden käyttäminen tekee ohjelmakoodista myös ymmärrettävämpää ja helpompilukuista. Yleisesti ottaen ohjelmointikielen ymmärrettävyys kasvaa abstraktiotason kasvaessa. Esimerkiksi matemaattisesti tutulla tavalla kirjoitetut aritmeettiset lausekkeet ovat ymmärrettävämpiä kuin vastaava laskenta symbolisella konekielellä ohjelmoituna. Lisäksi useat korkean tason ohjelmointikielet mahdollistavat — mikäli tarvittavat kääntäjät ovat olemassa — saman ohjelmakoodin käyttämisen useissa eri laitteistoissa.

Laitteistojen monipuolistuessa kääntäjiä tarvittiin yhä enemmän. Ristiinkääntämisestä, jossa käännettävä ohjelma toimii eri laitteistolla kuin sitä käännetään, tuli suosittua. Ristiin kääntämisen helpottamiseksi kehitettiin välikieliä. Niiden avulla tarvittavan ohjelmoinnin määrä saatiin pienemmäksi.

Kääntäjien monimutkaistuessa niiden kuvaamiseksi kehitettiin erilaisia kaavioita. Yleisimmin käytetty T-kaavio kuvaa kääntäjiä hyvin korkealla tasolla. Niitä käyttäen voidaan kuitenkin kuvata monimutkaisiakin rakenteita helpolla ja ymmärrettävällä tavalla.

Ketjuttamisen, tekniikan jossa jonkin korkean tason ohjelmointikielen kääntäjä kääntää itsensä, avulla kääntäjiä voidaan kehittää samalla ohjelmointikielillä jota ne kääntävät. Yhdistämällä ristiinkääntämisen ja ketjuttamisen, voidaan kääntäjiä siirtää tehokkaasti laitteistojen välillä.

Luvussa 2 käsitellään assemblykääntäjien historiaa sekä toimintaa. Korkean tason

ohjelmointikielten historiaa esitetään luvussa 3. Läpi käydään merkittävien kielten ja kääntäjien kehitystä muutaman vuosikymmenen ajalta. Luku 4 käsittelee ristiinkääntämistä ja välikieliä. T-kaaviot esitetään luvussa 5 ja niiden avulla kuvataan kääntäjien rakennetta sekä ketjuttamista luvussa 6. Kääntäjien tarkempi toteutus ja vaihejako, kuten syntaktinen ja semanttinen analyysi jäävät tämän tutkielman ulkopuolelle.

2 Symbolinen konekieli ja assemblykääntäjät

Erään määritelmän mukaan assemblykääntäjä on kääntäjä, joka kääntää symbolisella konekielellä kirjoitettuja komentoja konekielisiksi komennoiksi (Salomon, 1993: 1). Koska jokaisella laitteistolla on oma konekielensä ja tämä konekieli on myös ohjelmointikieli, pätee yleinen kääntäjien määritelmä myös assemblykääntäjiin. Lähdekielenä assemblykääntäjän ymmärtämä symbolinen konekieli tarkoittaa konekieltä, jossa laitteen ymmärtämät binääriset konekäskyt on korvattu ihmisille helpommin muistettavilla sanoilla eli symboleilla.

2.1 Ensimmäiset assemblykääntäjät

Ennen symbolisten konekielten kehitystä ohjelmoitiin vain laitteistoriippuvaisilla konekielillä. Siitä huolimatta, että käskykannat olivat nykyiseen verrattuna suhteellisen yksinkertaisia, oli ohjelmointi hidasta ja työlästä. Symbolisten konekielten kehitys helpotti ohjelmointityötä ja vähensi virheiden määrää.

Ensimmäiset assemblykääntäjät olivat niin sanottuja assemble-go-kääntäjiä, jotka osasivat ainoastaan lähdekoodin kääntämisen suoraan muistiin ja sen suorittamisen (Salomon, 1993: 2). Pian ymmärrettiin kuitenkin tarve kohdekoodin kirjoittamiseksi tiedostoon. Tämä mahdollisti ohjelmoinnin jakamisen useaan tiedostoon sekä aiemmin kirjoitettujen kirjastojen käyttämisen (ibid). Koska ennen ensimmäisiä assemblykääntäjiä ei ollut mitään ohjelmointia helpottavia työkaluja, tuli ne ohjelmoida suoraan konekielellä. Myöhemmin kääntäjiä pystyttiin ohjelmoimaan aiempia kääntäjiä apuna käyttäen ja niihin oli helpompia lisätä ominaisuuksia.

EDSAC (electronic delay storage automatic calculator) oli yksi ensimmäisiä sähköisiä tietokoneita. Se kehitettiin Cambridgen yliopistossa ja saatiin käyttövalmiiksi vuonna 1949 (Salomon, 1993: 7). EDSAC:lle kehitettiin assemblykääntäjä Initial Order, joka toimi laitteiston lukumuistissa (ROM) (ibid). EDSAC:n kehittäjä Maurice

Wilkes ehdotti ensimmäisenä tunnusten (label) sekä makrojen käyttöä symbolisten konekielten kääntäjiin (Salomon, 1993: 7). Tunnusten, joita hän kutsui liukuviksi osoitteiksi, avulla ohjelmoijan ei enää tarvitsisi pitää kirjaa koodirivien osoitteista.

IBM 704/702 tietokoneet valmistuivat 1956. Niiden ensimmäinen assemblykääntäjä UASAP-1 oli alkuun hyvin yksinkertainen. Se kykeni kääntämään vain tekstuaalisia symbolisia konekäskyjä yksi yhteen ennalta määrättyjen sääntöjen perusteella (Rosen, 1964: 10). Myöhemmin UASAP:iin ohjelmoitiin tuki myös tunnusten ja makrojen käyttämiseksi (Salomon, 1993: 8). Melwin Conwayn vuonna 1958 julkaisema UNIVAC:n assemblykääntäjä UNISAP oli ensimmäinen, joka mahdollisti kahden erilaisen tunnuksen käytön, paikallisen sekä globaalin (Salomon, 1993: 37).

Korkean tason kielten kääntäjiä alettiin kehittää pian ensimmäisten assemblykääntäjien valmistuttua, mutta symbolisilla konekielillä ohjelmointi pysyi pitkään suosiossa. Vaikka nykyaikaiset korkean tason ohjelmointikielten kääntäjät tuottavat hyvin optimoitua koodia, on hyvän ohjelmoijan kirjoittama symbolinen konekieli silti usein tehokkaampaa. Tämän takia symbolisia konekieliä käytetään jonkin verran matalan tason ohjelmoinnin lisäksi suurta laskentatehoa vaativien ohjelmien optimointiin.

2.2 Assemblykääntäjien toiminta

Assemblykääntäjät ymmärtävät jotakin symbolista konekieltä ja tuottavat tästä konekielisen ohjelman. Symboliset konekielet ovat matalan tason laiteriippuvaisia ohjelmointikieliä. Niitä käännetään lähdekoodista yksinkertaisin, ennalta määrättyin ehdoin konekielelle. Jokaisella symbolisella konekäskyllä on siis yksiselitteinen vastine konekielellä, joten tietty symbolinen konekieli toimii vain tietyllä laitteistolla (Salomon, 1993: 2). Jokainen lähdetiedoston konekäsky käännetään staattisen ohjauskooditaulukon avulla, josta etsitään symbolista konekäskyä vastaava laitteiston ymmärtämä binäärikoodi (Salomon, 1993: 17).

Lähes kaikki nykyaikaiset assemblykääntäjät sisältävät myös niin sanottuja direktiivejä. Pseudokomennot eli direktiivit ovat kääntäjän omia komentoja, joille ei ole mitään vastinetta laitteiston ymmärtämällä konekielellä. Ne vaikuttavat kuitenkin käännettyyn ohjelmaan jollain tavalla, esimerkiksi varaamalla tilaa muuttujina käytettävälle muistipaikoille. Direktiivit pikemminkin suoritetaan kuin käännetään (Salomon, 1993: 13). Jokainen lähdetiedoston rivi sisältää joko symbolisen konekäskyn tai direktiivin mikäli kääntäjä niitä tukee. Jotkin assemblykääntäjät tukevat myös niin sanottuja makroja. Makrot ovat oikeastaan monimutkaisia direktiivejä, jotka

ennen varsinaista koodin kääntöä käsitellään ja niistä tuotetaan symbolista konekieltä (Salomon, 1993: 109).

Symbolisten konekielten kääntäminen tapahtuu suurimmaksi osaksi yksi yhteen edellä kuvatulla tavalla. Poikkeuksen muodostavat tunnukset, jotka käsitellään ohjauskooditaulukosta poiketen dynaamisessa muistirakenteessa. Tunnukset ovat symbolisia nimiä muistipaikoille. Niiden arvot määräytyvät vasta käännöksen yhteydessä. Tunnusten avulla muistipaikat voidaan nimetä eikä ohjelmoijan tarvitse pitää kirjaa konekäskyjen osoitteista. Tunnuksiin sidottuja muistipaikkoja voidaan myös käyttää muuttujina. Useissa ohjelmointikielissä on direktiivi, jolla voidaan varata muistia ja viitata siihen tunnuksen avulla.

Kuva 1 selventää symbolisten konekielten määrittelemien symbolien sekä ohjelmoijan määrittelemien tunnusten eron. Esimerkkikoodi on TTK91-virtuaaliprosessorille (Helsingin yliopisto, Tietojenkäsittelytieteen laitos, 1991) tehty ohjelma, joka tulostaa käyttäjälle kokonaisluvut nollasta viiteen. Keltaisella pohjalla olevat symbolit ovat tunnuksia, joilla voi olla eri arvo käännöskerrasta ja kääntäjästä riippuen. Harmaalla pohjalla oleva koodi käännetään siis täysin ennalta määrätysti. Tunnukset määritellään käyttämällä niitä konekäskyn vasemmalle puolelle varatussa tunnuskentässä. Käyttö puolestaan tapahtuu, kun tunnukseen viitataan konekäskyn operandina (Salomon, 1993: 17).

	LOAD	R1,	=	0
	STORE	R1,		X
LOOP	LOAD	R1,	=	5
	COMP	R1,		X
	JGRE			END
	LOAD	R1,		X
	OUT	R1,	=	CRT
	ADD	R1,	=	1
	STORE	R1,		X
	JUMP			LOOP
END	NOP			

Kuva 1: TTK91-esimerkkikoodi.

3 Historiaa korkean tason kielten kääntäjistä

Korkean tason ohjelmointikielellä tarkoitetaan tässä tutkielmassa ohjelmointikieltä, jossa lähdekieli ja siitä käännettävä konekieli ovat selkeästi eri abstraktiotasoilla. Toisin sanoen korkean tason ohjelmointikielellä viitataan kieleen, joka ei ole (symbolinen) konekieli. Korkean tason ohjelmointikielten kääntäminen edellyttää siis muutakin, kuin mekaanista sanojen vaihtamista ennalta määrättyjen sääntöjen perusteella.

3.1 Täsmällisten kuvausjärjestelmien kehitys

Tietojenkäsittelytieteessä kuvataan ohjelmien suoritusta ja algoritmeja täsmällisesti. Ennen formaaleja merkintätapoja ja korkean tason ohjelmointikieliä ainoa täsmällinen tapa algoritmien kuvaamiseksi oli niiden kirjoittaminen konekielellä. Alan Turingin tunnetussa julkaisussa (Turing, 1937) esitettiin määritelmä laskenta-automaatista, joka paremmin tunnetaan Turingin koneena. Sen yhteydessä määriteltiin myös matemaattinen formalismi, jolla automaatin toimintaa voitiin täsmällisesti kuvailla. Vaikka esitystapa oli vaikea ja esitelty automaatti hypoteettinen, se edusti Alonzo Churchin merkintätavan (Church, 1936) ohella kehittyneintä formaalia laskennan kuvausta, 'kieltä', joka siihen aikaan oli olemassa.

Vuonna 1945 saksalainen Konrad Zuse aloitti tietokoneohjelmien kuvailuun tarkoitetun kielen Plankalkülin kehittämisen (Knuth and Pardo, 1976: 8). Zusen sanoin Plankalkülin tarkoitus oli luoda puhtaasti formaali esitystapa mille tahansa laskentaongelmalle (Knuth and Pardo, 1976: 10). Plankalkülissa voidaan määritellä aritmetiikan ja ohjausrakenteiden lisäksi rajaton määrä sisäkkäisiä tietorakenteita, ja Zusen työhön viitataan usein ensimmäisenä korkean tason ohjelmointikieleenä. Vaikka kyseessä oli huomattavan edistyksellinen järjestelmä, se ei kuitenkaan vaikuttanut ohjelmointikielten kehitykseen juuri lainkaan, sillä artikkeli julkaistiin vasta vuonna 1972.

Samoihin aikoihin Zusen kanssa myös Yhdysvaltalaiset Herman Goldstine ja John von Neumann kehittivät laskennallista formalismia. Heidän ratkaisunsa algoritmien ja tietokoneohjelmien kuvaamiseen oli varsin erilainen. Von Neumann ja Goldstine esittivät ratkaisuksi lohkoakaaviota (flow diagram), esitystapaa, jossa ohjelmat kuvataan nuolien ja laatikoiden avulla (Knuth and Pardo, 1976: 16). Lohkoakaaviot esitellyt artikkeli (Goldstine and von Neumann, 1947) saavutti suuren lukijakunnan ja sillä oli suuri vaikutus ohjelmointikielten kehitykseen (Knuth and Pardo, 1976:

16) .

Vuonna 1946 Marylandissa työskennellyt Haskell B. Curry kehitti ENIAC-tietokoneelle aikaansa nähden monimutkaista ohjelmaa. Curryn työ ENIAC:n parissa sai hänet ehdottamaan formalismia ohjelmistojen toiminnalle. Hänen formalisminsa perustui uuteen ajatukseen ohjelman suorituksen lohkomaisesta rakenteesta. Näitä itsenäisesti suoritettavia osia hän nimitti divisiooniksi (Curry, 1950: 34). Divisioonat tulisi rakentaa siten, että niiden laskenta olisi toisistaan riippumatonta. Tämän voisikin rinnastaa esimerkiksi C-kielen paikallisiin tietorakenteisiin ja käännösyksiköihin perustuvaan suoritukseen. Curryn formalismi oli kuitenkin hieman luonnoton, sillä suoritusyksiköillä oli useita lopetuskohtia sekä nykykielistä poiketen useita aloituskohtia (Knuth and Pardo, 1976: 21). Historiallisesti työ oli kuitenkin merkittävä, sillä Curry kuvaili algoritmeja joilla hänen kehittämästään ohjelmointikielestä pystyttiin tuottamaan konekieltä. Näitä rekursiivisia, vaikkakin toteuttamatta jääneitä, algoritmeja voidaankin pitää ensimmäisinä koodin generointiin tarkoitettuina algoritmeina (Knuth and Pardo, 1976: 22). Curryn artikkeleita koodin generoinnista ei kuitenkaan ikinä julkaistu, joten niiden vaikutus ohjelmointikielten kehitykseen jäi vähäiseksi (Knuth and Pardo, 1976: 20).

3.2 Kohti ensimmäisiä kääntäjiä

Millekään aiemmin mainituista ohjelmointikielistä ei niiden julkaisun yhteydessä toteutettu kääntäjiä. Nämä kielet toimivat ohjelmoijien käsitteellisenä apuna auttaen ohjelmien suunnittelussa, mutta jättäen toteutuksen ihmisille. Tästä huolimatta ne olivat merkittäviä askeleita kohti parempia ohjelmointikieliä sekä niiden kääntäjiä. Ilman täsmällisiä esitystapoja ei koodin generointi, eli varsinainen käännöksen tai tulkkauksen suorittaminen, ikinä olisi voinut tulla mahdolliseksi.

Ensimmäinen korkean tason ohjelmointikieli joka toteutettiin oli Short Code. Sitä kehitti John W. Mauchly ja William F. Schmitt toteutti sille tulkin vuonna 1949 (Knuth and Pardo, 1976: 23). Tulkki toimi alkuun BINAC-tietokoneella, mutta se ohjelmoitiin myöhemmin myös UNIVAC:lle. Yksityiskohtia Short Coden toiminnasta ei ikinä julkaistu, joten sen tarkemmasta toiminnasta ei ole tietoa. Vuonna 1955 julkaistussa ohjelmoijille tarkoitetussa manuaalissa kerrotaan kuitenkin kuinka ohjelmaa voidaan käyttää (ibid). Short Code oli siis tulkki, joka osasi suorittaa aritmeettisia laskutoimituksia ilman konekielistä ohjelmointia. Ohjelma luki syötettä ja tulkki vastaavat toiminnot ajetuslaiteistolle.

1950-luvun alussa Heiniz Rutishauser ja Corrado Böhm työskentelivät Zürichin teknillisessä yliopistossa Sveitsissä. Vaikka he työskentelivät samassa paikassa ja saman aiheen parissa, he tekivät töitä itsenäisesti. Rutishauser julkaisi vuonna 1952 artikkelin, jossa hän kuvasi hypoteettisen tietokoneen sekä siinä toimivan kääntäjän kehittämälleen ohjelmointikielelle (Knuth and Pardo, 1976: 30). Julkaisu oli merkittävä, sillä siinä kuvattiin ensimmäistä kertaa menetelmä kääntäjien toteuttamisesta sekä koodin generoinnista (ibid).

Myös Corrado Böhm kehitti samaan aikaan itsenäisesti ohjelmointikieltä sekä tämän kääntäjää. Hänen julkaisunsa oli Rutishauserin julkaisua vieläkin merkittävämpi, sillä hän oli toteuttanut kääntäjän omalla kielellään (Knuth and Pardo, 1976: 36). Böhmin kääntäjä kykeni tarkistamaan koodin syntaksia lineaarisessa ajassa, kun Rutishauserin kääntäjä puolestaan toimi neliöisessä ajassa (Knuth and Pardo, 1976: 40). Lisäksi Böhmin kääntäjä hallitsi matemaattisten operaattoreiden sidontajärjestyksen, sekä osasi käsitellä sulkeita aritmeettisissa lausekkeissa. Böhm oli myös ensimmäinen, joka todisti matemaattisesti ohjelmointikielensä voivan laskea minkä tahansa laskettavan funktion (Knuth and Pardo, 1976: 42).

Vaikka Rutishauser ja Böhm olivat kumpikin ohjelmoineet omat kääntäjänsä, pidetään ensimmäisenä oikeana kääntäjänä silti Alick E. Glennien 1952 valmistamaa AUTOCODE-ohjelmistoa (Knuth and Pardo, 1976: 42). Rutishauserin ja Böhmin kääntäjistä poiketen AUTOCODE ei toiminut hypoteettisella laitteistolla joten sen tuottama konekieli oli täten suoritettavissa (? : 45). AUTOCODEa pystyttiin siis käyttämään oikeiden, käyttökelpoisten ohjelmien tekemiseen (Knuth and Pardo, 1976: 42).

Vuoden 1954 alussa John Backus rupesi kehittämään kokoamansa kehittäjäryhmän kanssa automaattisen ohjelmoinnin järjestelmää. Järjestelmän oli tarkoitus olla hyvin kehittynyt, joten suureksi haasteeksi muodostui järjestelmän saaminen tarpeeksi tehokkaaksi. Loppuvuodesta 1954 kehittäjäryhmä julkaisi suunnitelman järjestelmästä 'The IBM Mathematical FORMula TRANstating system' — FORTRAN. Ryhmän julkaisu alkoi painottamalla sitä tosiasiaa, että FORTRAN oli tehokas. Aiemmin ohjelmoijien tuli valita helpon ohjelmoinnin ja hitaan suorituksen tai työlään ohjelmoinnin ja nopean suorituksen väliltä, mutta julkaisun jälkeen FORTRAN tarjoaisi parhaat puolet molemmista (IBM Corporation, 1954: 1). Ensimmäinen FORTRAN-dokumentti sisältää myös ensimmäisen yrityksen esittää ohjelmointikielen kielioppi täsmällisesti. Tätä voidaan pitää Backuksen myöhemmin esittämän kielioppimuodon Backus Naur Formin (BNF) edeltäjänä (Knuth and Pardo, 1976:

63).

Kun FORTRAN kaksi ja puoli vuotta myöhemmin saatiin toteutettua, oli se aikansa tehokkain sekä monipuolisin ohjelmointikieli. FORTRAN:n kääntäjällä tuotettiin suhteellisen tehokasta koodia ja kehittäjät sanoivat sen olevan lähes yhtä tehokasta kuin hyvän ohjelmoijan kirjoittama symbolinen konekieli (Backus et al., 1956: 1). FORTRANissa oli myös paljon ominaisuuksia, joita ei oltu aiemmin nähty. Se oli esimerkiksi ensimmäinen ohjelmointikieli, jossa muuttujien nimet voivat olla useamman merkin pituisia (Knuth and Pardo, 1976: 62).

Ensimmäisen julkaisun jälkeen FORTRAN:ssa oli kuitenkin useita ongelmia. Virheitä oli paljon ja moni epäili ettei FORTRAN ikinä tulisi toimimaan (Rosen, 1964: 4). Vaikeuksista huolimatta FORTRAN:sta tuli hyvin suosittu ja sitä käytettiin enemmän kuin oltiin osattu odottaa.

Taulukko 1 tiivistää aiemmissa kappaleissa esiteltyjen ohjelmointikielten merkittävimmät piirteet. Lisäksi taulukossa esitellään ohjelmointikielten nimet sekä päätekijät.

Taulukko 1: Yhteenveto ohjelmointikielten kehityksestä (Knuth and Pardo, 1976: 93).

Kieli	Kehittäjä	Ensimmäinen
Plankalkül	Zuse	Ohjelmointikieli, Hierarkkinen data
Virtauskaaviot	Goldstine, Von Neumann	Hyväksytty ohjelmointimenetelmä
Short Code	Mauchly	Toteutettu korkean tason ohjelmointikieli
Formules	Böhm	Kääntäjä omalla kielellään
AUTOCODE	Glennie	Käyttökelpoinen kääntäjä
FORTRAN I	Backus	I/O formaatti, kommentit, globaali optimointi

4 Välikielet ja ristiinkääntäminen

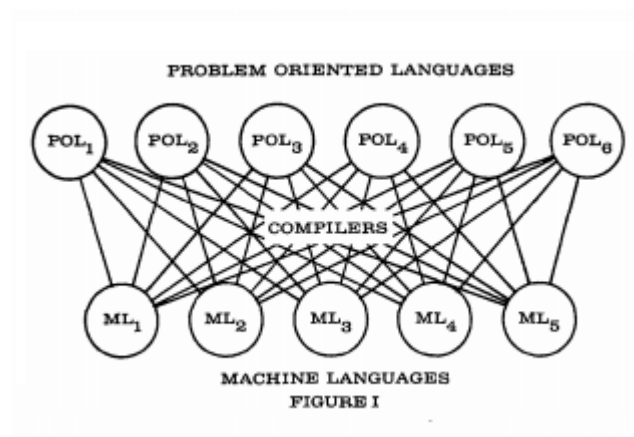
Jo 1950-luvun lopulla sekä käytettävissä olevien ohjelmointikielten että erilaisten laitteistojen määrä oli kasvanut merkittävästi. Korkean tason ohjelmointikielillä ohjelmoinnista oli tullut yleistä ja sen hyödyt olivat laajalti tunnettuja (Strong et al., 1958: 12). Uusien laitteistojen kehitys oli nopeaa ja tyypillisesti laitteistoja uusittiin viimeistään viiden vuoden välein (ibid). Vaikka korkean tason ohjelmointikielten

käyttö vähensi tarvetta sovellusten uudelleenohjelmoinnille, muodostui kääntäjien kehitys merkittäväksi ongelmaksi. Tehokkaan kääntäjän kehittämiseen kuluva aika oli samaa suuruusluokkaa laitteistojen käyttöiän kanssa, joten hyvien kääntäjien valmistuttua oli laitteisto usein jo vanhentunut (ibid). Ongelmaa koitettiin välttää erilaisilla käännöstekniikoilla. Yleiseksi tavaksi muodostui ristiinkääntäminen uusille laitteistoille.

4.1 Ristiinkääntäminen

Tavallisesti tietokonejärjestelmissä käytettävät kääntäjät tuottavat konekieltä samalle laitteistolle, jossa niitä suoritetaan. Ristiinkääntämisellä (cross compiling) tarkoitetaan sitä, että kohdelaitteisto on jokin muu kuin käännöstä suorittava laitteisto (Free Software Foundation, Inc., 2016). Ristiinkääntämisen mahdollistamiseksi tarvitaan siis kääntäjiä, jotka tuottavat konekieltä uudelle laitteistolle. Nämä ohjelmoidaan vanhalla laitteistolla jo olemassa olevia ohjelmointikieliä käyttäen. Täten saaduilla ristiinkääntäjillä pystytään kääntämään kääntäjiä tai muita ohjelmia, jotka toimivat uudessa laitteistossa.

Ongelmana edellä mainitussa menetelmässä on suuri sekä kasvava joukko lähde- ja kohdekieliä. Jo yhden uuden kääntäjän toteuttaminen on varsin työlästä, joten uuden kääntäjän tekeminen kaikille halutuille laitteistoille vaatisi valtavasti resursseja. Oletetaan, että korkean tason ohjelmointikielten määrä on N ja laitteistojen määrä on M . Tällöin tarvittavien kääntäjien määrä on $N \cdot M$, joka kasvaa neliöisesti kohde- ja lähdekielten kasvaessa. Kuva 2 esittää tilannetta jossa on kääntäjät kuudelle eri ohjelmointikielelle viiteen eri laitteistoon.



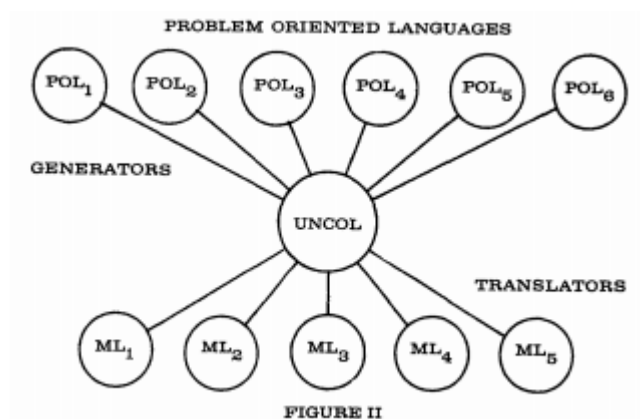
Kuva 2: Ristiinkääntäminen usealta lähdekieleltä usealle kohdekielelle. (Steel, Jr., 1961: 378)

4.2 Välikielet

Mikäli olisi olemassa sellainen ohjelmointikieli, jolle olisi toteutettu kääntäjä kaikille mahdollisille laitteistoille, voitaisiin korkean tason ohjelmointikielet kääntää mille tahansa laitteistolle tätä kieltä apuna käyttäen. Tällaisella menetelmällä tarvittavien kääntäjien määrä vähenisi huomattavasti. Uudet ohjelmointikielet saataisiin toimimaan millä tahansa laitteistolla vain yhden uuden kääntäjän avulla. Uuden ohjelmointikielen kääntäjät kääntäisivät niitä kyseiselle välikielelle, josta se voitaisiin jo olemassa olevien kääntäjien avulla kääntää mille tahansa laitteistolle.

Idea tunnettiin alun perin nimellä UNCOL (UNiversal Computer Oriented Language) (Strong et al., 1958: 14). UNCOL ei ollut niinkään suunniteltu ohjelmointikieli, vaan pikemminkin idea välikielestä, jonka avulla kääntäjiä voisi toteuttaa pienemmällä vaivalla. Siitä puhuttiin jo vuonna 1954, eikä konseptin alkuperäistä keksijää tunneta (ibid).

Mikäli jonkinlainen UNCOL — kaikkien kääntäjien tuntema välikieli — olisi olemassa, vähenisi ristiinkääntämiseen tarvittavien kääntäjien määrä huomattavasti. Jos ohjelmointikielten määrä on N ja laitteistojen määrä M , tarvittaisiin tällaisessa välikieliratkaisussa vain $N + M$ kääntäjää (Speetjens, 1976: 15). Toisin sanoen kääntäjien määrä kasvaisi lineaarisesti ohjelmointikielten ja laitteistojen suhteen. Kuvassa 3 esitetään tilanne välikielen avulla.



Kuva 3: Ristiinkääntäminen välikielillä. (Steel, Jr., 1961: 378)

UNCOL:ksi on ehdotettu useita eri välikieliä, mutta yhdestäkään ei ole tullut niin käytettyä, että sitä voitaisiin sanoa universaaliksi. Eräs UNCOL:ksi ehdotettu kieli oli Melvin Conwayn 1958 julkaisema välikieli. Conwayn julkaisussa *Proposal for an UNCOL* määritellään matalan tason välikieli, jota hän kutsuu SML:ksi (Simple Machine Language) (Conway, 1958: 5).

Kaikilla laitteilla toimivan välikielen tulisi olla täysin laitteistoriippumaton. Laitteistoriippumattomalla kielellä tarkoitetaan, että se voidaan kääntää tehokkaasti mille tahansa laitteistolle (Brown, 1972: 1060). Koska erilaisia laitteistoja on hyvin suuri määrä, ei mikään kieli ole täysin laitteistoriippumaton (ibid). Näin ollen kaikille laitteistoille käännettävän välikielen toteutus on melko utopistista. Useat laitteistot ovat kuitenkin tarpeeksi samankaltaisia tehokkaan välikielen kehittämiseksi, mikäli tavoiteltujen kohdelaitteistojen määrää pienennetään. Suurin osa eniten käytetyistä tietokoneista toimii niin samankaltaisesti, että hyvä välikieli kykenee kattamaan niistä suurimman osan (ibid).

Vaikka välikielet ovat usein laitteistoläheisiä ja ne käännetään suoraan jollekin konekielelle, voisi välikieli teoriassa olla hyvinkin korkeatasoinen. Jos jollekin laitteistolle on olemassa hyvä jonkin korkean tason ohjelmointikielen kääntäjä, voisi välikieli olla myös korkean tason ohjelmointikieli, jonka kohdekielenä ei olisi mikään konekieli vaan kyseinen toinen korkean tason ohjelmointikieli (Brown, 1972: 1060). Koska tällainen tekniikka tuottaa käytännössä aina tehotonta koodia, käännetään välikielet lähes poikkeuksetta, vaikka olisivatkin korkean tasoisia ohjelmointikieliä, suoraan

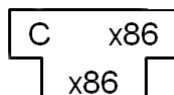
konekieliksi (ibid).

5 Kääntäjien kuvaus: T-kaaviot

Kääntäjien suunnittelussa ja mallintamisessa on käytetty useita erilaisia merkintätapoja. Käytetyin ja tunnetuin lienee Harvey Bratmanin 1961 ehdottama T-kaavio. Hän kehitti sen (Strong et al., 1958)-julkaisussa esitellyn UNCOL-kaavion korvauksiksi (Bratman, 1961).

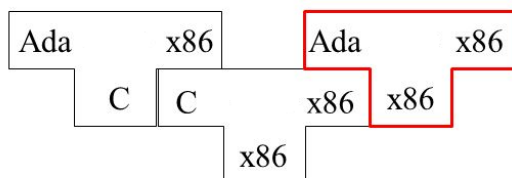
5.1 Alkuperäinen Bratman-kaavio

Harvey Bratmanin esittelemä kaavio kuvaa yksittäistä kääntäjää. Siitä käy ilmi kääntäjän ymmärtämä kohde- ja lähdekieli sekä kieli, jolla kääntäjä toimii. Kaavioita kutsutaan Bratman-kaavioksi tai T-kaavioksi. Jälkimmäinen nimi tulee kaavion muodosta, jossa T-kirjaimen muotoisessa alueessa vasempaan pätyyn merkitään lähdekieli, oikeaan pätyyn kohdekieli ja alaosaan kieli jolla kääntäjä toimii.



Kuva 4: T-kaavio, joka kuvaa x86-arkkitehtuurilla toimivaa C-kääntäjää, jonka kohdekieli on x86-konekieli.

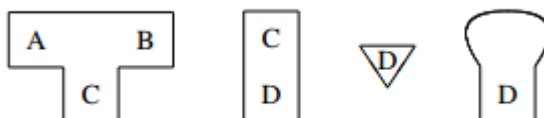
Kaavioita toisiinsa liittämällä voidaan havainnollistaa monimutkaisiakin kääntäjillä suoritettavia toimintaketjuja. Kuvassa 5 oletetaan, että käytössä on C-kielinen kääntäjä, joka kääntää Ada-kieltä x86-konekielelle. Lisäksi käytössä on kuvan 4 x86-arkkitehtuurilla toimiva C-kääntäjä, jonka kohdekieli on x86-konekieli. Näiden kahden kääntäjän avulla voidaan tuottaa x86-alustalla suoritettava Ada kääntäjä, jonka kohdekieli on x86. Kahden ensimmäisen kääntäjän yhteistyöllä saadaan siis kolmas kääntäjä. Huomattavaa on, että kaavion alin kääntäjä toimii aina jossakin todellisessa laitteistossa, eikä täten voi olla muu kuin laitteiston ymmärtämä konekieli.



Kuva 5: C-kielisen Ada-kääntäjän ja x86:lla toimivan C kääntäjän avulla voidaan tuottaa x86:lla toimiva ada-kääntäjä.

5.2 Earleyn ja Sturgisin merkintätapa

T-kaavio on melko yksinkertainen, joten siitä on kehitetty paranneltuja vaihtoehtoja. Jay Earley ja Howard Sturgis laajensivat Bratmanin kaaviota lisäämällä siihen ominaisuuksia (Earley and Sturgis, 1970: 607-616). Alkuperäisen T-kaavion kuvatesa vain kääntäjiä, Earleyn ja Sturgisin kaavioissa pystyy kuvaamaan myös tulkkeja. Lisäksi niihin sisällytettiin suoritusta sekä sovellusohjelmaa kuvaava osa. Heidän kaavioissaan määritellään kuvan 6 mukaiset elementit.

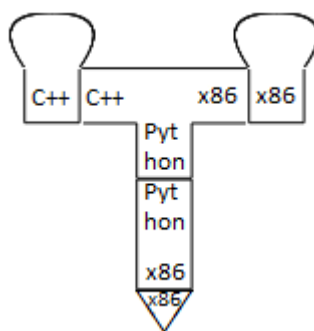


Kuva 6: Earleyn ja Sturgisin T-kaavioelementit. (Mogenssen, 2010: 282)

Kuvan vasemman puoleisin elementti vastaa Earleyn ja Sturgisin merkintätavassa alkuperäistä T-kaaviota. Se kuvaa C-kielistä kääntäjää joka kääntää kieleltä A kielelle B. Suorakaiteen muotoinen kahdesta osasta koostuva kaavio kuvaa tulkkeja, joka tulkkaa kieltä C ja toimii kielellä D. Jotta käänös voitaisiin suorittaa, tulee pohjimmaisena kielen olla suoritettavissa jollakin oikealla laitteistolla. Tätä suoritusta

kuvaa yksiosainen kolmiomerkintä. Kolmion sisällä lukee, millä konekielellä suoritustapahtuu. Esimerkkikuvassa konekieli on D. Viimeinen kaavio tarkoittaa jotain sovellusohjelmaa tai määrittelemätöntä laskentaa. Kaavion sisällä lukee ohjelmointikieli, jolla sovellus on ohjelmoitu tai jolle se on käännetty. Esimerkkikuvassa kieli on D (Mogensen, 2010: 282).

Kyseisiä kaavioita voi yhdistellä hyvinkin monimutkaisiksi rakenteiksi. Kuvan 7 esimerkissä on kaavio, joka kuvaa C++-kielisen ohjelman kääntämistä x86-konekielelle. Suoritus tapahtuu x86-laitteistolla, ja käännöksen tekee Pythonilla toimiva kääntäjä, joka tulkitaan x86-laitteistossa. Huomioitava T-kaavioiden käytössä on, että kaavioiden vierekkäisten osien kielten tulee täsmätä toisiinsa. Kuvan esimerkin käännös ei voi ottaa lähdeohjelmakseen muuta kuin C++:llä kirjoitetun ohjelman.



Kuva 7: Esimerkki Earleyn ja Sturgisin kaavioiden yhdistelemisestä.

6 Kääntäjien rakenne ja ketjutus

Koska kääntäjien ohjelmointi matalan tason ohjelmointikielillä on erittäin vaivalloista (Mogensen, 2010: 281), suositaan niiden kehittämisessä korkean tason ohjelmointikielten käyttöä. Yksi vaihtoehto on ohjelmoida kääntäjä jollakin kyseiselle laitteistolle jo olemassa olevalla ohjelmointikielellä. Tämä ei kuitenkaan aina ole mahdollista. Esimerkiksi, jos kyseessä on uusi prosessoriarkkitehtuuri, eikä tälle vielä ole kääntäjiä, on ohjelmointi tehtävä jollakin muulla tavalla.

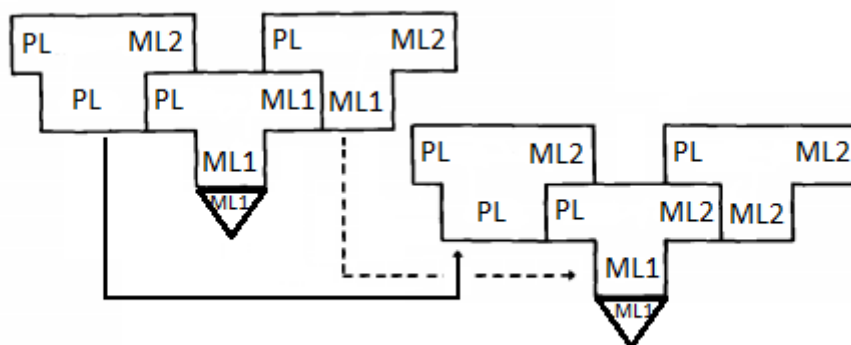
Kääntäjä, joka sekä kääntää että on suoritettavissa uudella laitteistolla voidaan toteuttaa ketjutukseksi (bootstrapping) kutsutulla tekniikalla (Mogensen, 2010: 281). Ketjutus on tekniikka, jonka ydinajatus on kääntää jokin kääntäjä sillä itsellään (Mo-

gensen, 2010: 281). Tavanomaisen kääntäjän sanotaan olevan ketjutettu jos se kääntää itsensä (Appel, 1994).

6.1 Iteratiivinen ketjutus

Perinteinen ongelma kääntäjien kehityksessä on tilanne, jossa kääntäjä pitää ohjelmoida ilman muita työkaluja ja kääntäjiä. Iteratiivisessa ketjutusmenetelmässä kääntäjä kehitetään kahdessa osassa. Ensin kääntäjästä tehdään hyvin suppea versio, joka osaa kääntää tavoitellusta ohjelmointikielestä vain pienen osajoukon (Mogensen, 2010: 287). Tämä ensimmäisen vaiheen kääntäjä voidaan ohjelmoida millä tahansa ohjelmointikielellä, mutta mikäli muiden ohjelmointikielten kääntäjiä ei ole saatavilla, se joudutaan tekemään konekielellä. Toisessa osassa kääntäjä ohjelmoidaan sen itsensä ymmärtämällä kielellä, eikä muita ohjelmointikieliä enää tarvita. Tällöin jo olemassa oleva kääntäjä voi kääntää seuraavan version itsestään. Koska kieli on tässä vaiheessa vielä hyvin vajavainen, olisi valmiin ohjelmointikielen toteuttaminen heti ensimmäisen vaiheen jälkeen erittäin työlästä. Toista vaihetta suoritetaan useita kertoja siten, että kääntäjän tuntemaa ohjelmointikieltä kasvatetaan ja siitä käännetään uusi kääntäjä. Saadun kääntäjän avulla voidaan seuraava versio toteuttaa käyttäen uusia ominaisuuksia. Seuraavan version avulla tehdään jälleen seuraava versio, ja niin edelleen. Huomioitavaa prosessissa on se, että kääntäjän uusi versio on kehitettävä aina käyttäen vanhan version tuntemaa ohjelmointikieltä.

Kuva 8 esittää edellä kuvattua tilannetta. Ensimmäisessä vaiheessa kääntäjän ensimmäinen versio ohjelmoidaan konekielellä (ML, "Machine Language") ja tämän jälkeen ohjelmointikieltä (PL, "Programming Language") laajennetaan iteratiivisesti, kunnes tavoiteltu kieli on saavutettu.



Kuva 9: Kääntäjän siirtäminen uudelle laitteistolle ristiinkääntämisen ja ketjutuksen avulla.

Edellä kuvattu esimerkki on toimiva, mutta se edellyttää kääntäjän kirjoittamisen kokonaan alusta loppuun asti sen omalla lähdekielellä. Koska korkean tason ohjelmointikielten kääntäjät voivat olla todella monimutkaisia ja koostua suuresta määrästä lähdekoodia, on tämänkaltaisen prosessi varsin työläs. Vastaavan prosessin voi toteuttaa huomattavasti pienemmällä vaivalla, mikäli alkuperäisen kääntäjän rakenne olisi eri tavalla toteutettu.

6.3 Ketjuttamista helpottava kääntäjä rakenne

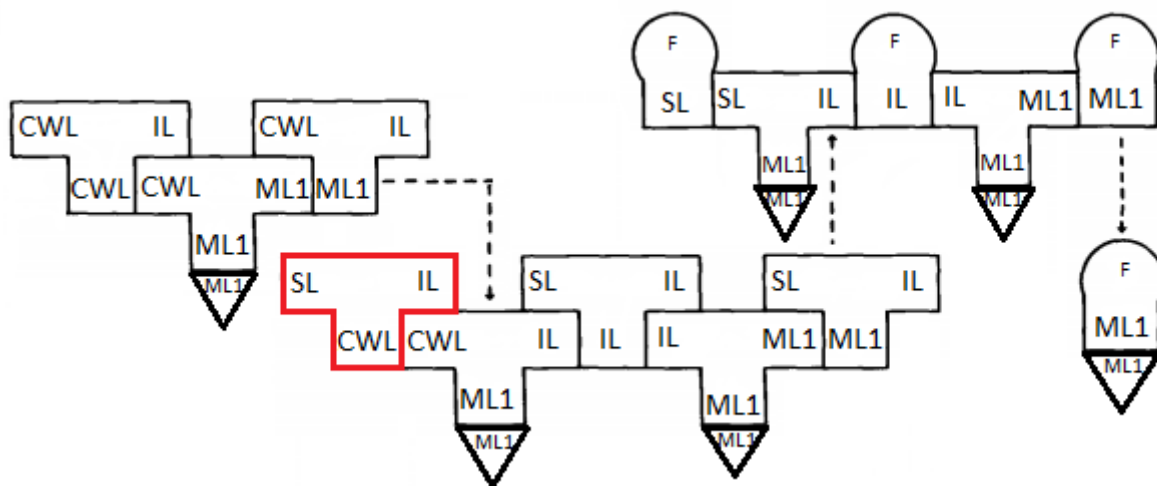
Vielä 1970-luvulla kääntäjät kirjoitettiin suurimmaksi osaksi yhtä lähdekieltä ja laitteistoa varten (Guilan et al., 2002: 38). 1980-luvulla ruvettiin kehittämään enenevässä määrin kääntäjäkokonaisuuksia, jotka kykenevät kääntämään useita eri lähdekieleä (ibid). Tällaisissa systeemeissä kääntäjän sisäinen rakenne oli jaettu lähdekielestä riippuvaiseen etuosaan (frontend) sekä näiden jakamaan takaosaan (backend). Tämän kaltaisen rakenne vähensi tarvetta kirjoittaa uutta koodia ja näin ollen pienensi kääntäjien kehityksestä koituvia kustannuksia. 80-luvun lopulla oli jo hyväksytty ajatus siitä, että kääntäjien kehitys usealle ohjelmointikielelle ja/tai laitteistolle on tehokkaampaa sekä kilpailukykyisempää (ibid).

Eräs tyypillinen tapa kääntäjien ohjelmoinnissa onkin jakaa sen sisäistä rakennetta sekä suorittaa käännös useassa eri vaiheessa. Apuna käytetään usein jotakin välikieltä (Speetjens, 1976: 15). Näin haluttu lähdekieli voidaan kääntää helpommin eri

laitteistoille.

Olettaen, että jollekin välikielelle IL ("Intermediate Language") ja jollekin korkean tason ohjelmointikielelle on olemassa tietyllä laitteistolla toimivat kääntäjät, voidaan halutun lähdekielen käännös suorittaa kaksivaiheisesti toteuttamalla korkean tason ohjelmointikielellä kääntäjä lähdekieleltä välikielelle (Earley and Sturgis, 1970: 610). Uuden lähdekielen toteutus sisältää siis vain korkean tason ohjelmointikielellä tehdyn kääntäjän käytetylle välikielelle, eikä koodin generointivaihetta tarvitse kirjoittaa uudestaan.

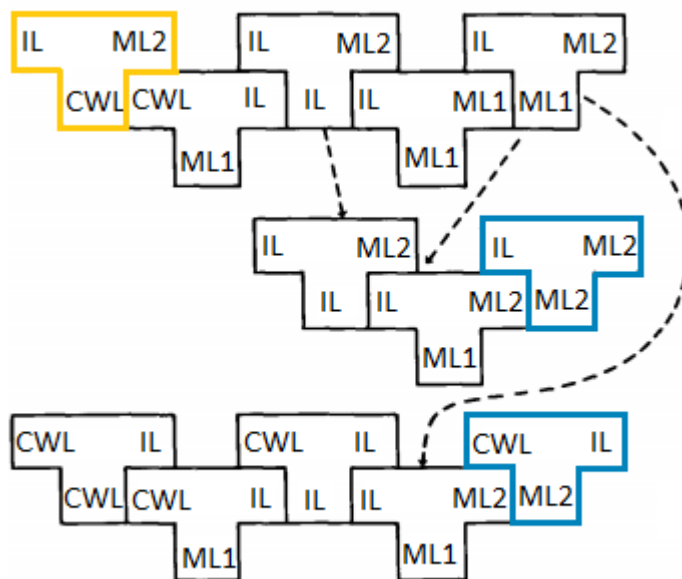
Kuva 10 demonstroi usein käytettyä rakennetta (Earley and Sturgis, 1970: 610), jolla kääntäjän jatkokehitystä voidaan helpottaa huomattavasti. Uuden ohjelmointikielen kääntäjän toteuttaminen kyseisen kääntäjän avulla on mahdollista vain yhden komponentin (punainen) uudelleenohjelmoinnilla. Vaihtamalla toisen vaiheen ensimmäinen kääntäjä kääntämään uudelta lähdekieleltä (SL, "Source Language") välikielelle, vaihtuvat myös seuraavissa komponenteissa olevat lähdekielet uuteen kieleen. Uusi kääntäjä tulee toteuttaa samalla ohjelmointikielellä, jolla aiempi komponentti on toteutettu (CWL, "Compiler Writing Language"). Esimerkiksi, jos kyseisellä järjestelmällä halutaan toteuttaa konekielellä ML1 suoritettava C-kääntäjä, tulee ohjelmoida vain sellainen osa, joka on kirjoitettu kielellä CWL ja kääntää C-kieltä välikielelle IL. Sama pätee muihinkin toteutettaviin ohjelmointikieliin.



Kuva 10: Kääntäjäkokonaisuus.

Pelkkää välikieltä apuna käyttäen uuden ohjelmointikielen toteutus ei vaatisi näin monimutkaista rakennetta. Kyseinen rakenne mahdollistaa kuitenkin sekä tehokkaan ristiinkääntämisen että itsensä ketjuttamisen uudelle laitteistolle. Jos kääntäjäkokonaisuuden halutaan kääntävän ymmärtämäänsä lähdekieltä uudelle laitteistolle jonka, konekieli on ML2, joudutaan siihen edelleen kirjoittamaan vain yksi uusi komponentti. Tämä osa kirjoitetaan kielellä CWL ja se kääntää välikieltä IL uuden laitteiston ymmärtämälle konekielelle ML2. Kun kyseinen osa käännetään jo olemassa olevalla kääntäjällä, saadaan tulokseksi samassa laitteistossa toimiva kääntäjä välikieltä uudelle konekielelle. Saadulla ristiinkääntäjällä on siis mahdollista kääntää lähdekieltä SL konekielelle ML2, mutta sen suoritus tapahtuu edelleen kielen alkuperäistä konekieltä ML1 ymmärtävässä laitteistossa.

Ristiinkääntämisen mahdollistavan uuden osan avulla myös koko kääntäjärakenteen ketjuttaminen uuteen laitteistoon on mahdollista ilman lisäohjelmointia (Earley and Sturgis, 1970: 610). Kuva 11 havainnollistaa tätä prosessia. Ensimmäisessä vaiheessa jo olemassaolevien komponenttien sekä uuden CWL:llä kirjoitetun välikielikääntäjän (keltainen) avulla tuotetaan seuraavissa vaiheissa tarvittavat komponentit. Näiden komponenttien avulla voidaan toisessa vaiheessa tuottaa ML2-konekielellä toimiva ja siihen kääntävä välikielikääntäjä. Kolmannessa vaiheessa tuotetaan ensimmäisessä vaiheessa saadun välikielikääntäjän avulla ML2-kielellä toimiva CWL-kääntäjä, joka tuottaa välikieltä.



Kuva 11: Kääntäjäkokonaisuuden ketjutus uudelle laitteistolle.

Sijoittamalla toisessa ja kolmannessa vaiheessa saadut kääntäjät (sininen) alkuperäiseen ohjelmistoon, saadaan sekä ML2-kielellä toimivat että sille kääntävät komponentit. Ainoa komponentti, jota ei saada suoraan sijoittamalla, on ensimmäisen vaiheen toinen komponentti. Uudella konekielellä toimivat kääntäjät $CWL \rightarrow IL$ ja $IL \rightarrow ML2$ vastaavat kuitenkin yhdessä tätä komponenttia.

Käsitelty kääntäjäkokonaisuus on monimutkainen, mutta myös tehokas. Sekä uuden lähdekielen toteutus alkuperäisellä laitteistolla että koko kääntäjäohjelmiston siirtäminen uuteen laitteistoon voidaan saavuttaa vain pienen osan uudelleenohjelmoinnilla. Lisäksi uudelleenohjelmointi voidaan suorittaa jo aiemmin käytetyllä korkean tason ohjelmointikielellä (Earley and Sturgis, 1970: 610).

7 Yhteenveto

Kääntäjällä tarkoitetaan tietokoneohjelmaa, joka kääntää lähdekielisen ohjelman kohdekieliseksi ohjelmaksi. Jokaisella laitteistolla on oma konekielensä, jota se kykenee suorittamaan. Aluksi ohjelmointi oli mahdollista vain tällä konekielellä. Koska konekielinen ohjelmointi oli työlästä ja virheeltistä, kehitettiin avuksi symbolisia konekieliä, joissa binääriset konekäskyt oli korvattu paremmin muistettavilla tekstuaalisilla symboleilla. Assemblykääntäjät tuottivat symbolisista konekielistä yksinkertaisten sääntöjen mukaan laitteiston ymmärtämää konekieltä.

Korkean tason ohjelmointikielet kehittyivät ohjelmoijien tarpeesta kuvata tietokoneiden toimintaa konekieliä korkeammalla abstraktiotasolla. Formaalien kuvausjärjestelmien kehittyessä kokeiltiin myös konekielen tuottamista automaattisesti korkean tason kielistä. Tämä automaattiseksi ohjelmoinniksi ja myöhemmin kääntämiseksi kutsuttu prosessi oli alkuun melko tehotonta. Moni tutkija pitikin sitä vain mielenkiintoisena tutkimuksena, mutta potentiaali niiden tehokkaaseen käyttöön selvisi varsin nopeasti. Viimeistään FORTRAN:n julkaisun jälkeen korkean tason ohjelmointikielten hyödyt oli laajasti hyväksytty.

Ensimmäiset kääntäjät kehitettiin tietyn lähde- ja kohdekieliparin kääntämiseen. Kielten ja laitteistojen monipuolistuessa tarvittavien kääntäjien määrä lisääntyi. Syntyi ajatus universaalista välikielestä, jonka avulla tarvittavien kääntäjien määrää voitaisiin pienentää ja ohjelmien ristiinkääntäminen uusille laitteistoille nopeutuisi. Vaikka mikään välikieli ei ikinä saanut universaalia asemaa, käytetään silti lähes kaikissa nykyaikaisissa kääntäjissä jotakin välikieltä käännöksen välivaiheena. Tällaiset kääntäjät on jaettu etuosaan, joka kääntää lähdekielen välikielelle, sekä takaosaan, joka kääntää välikielen halutulle laitteistolle. Välikieliä ja ristiinkääntämistä käytetään apuna myös ketjutuksessa. Tällöin kääntäjän ketjuttaminen uudelle laitteistolle onnistuu mahdollisimman vähällä uudelleenohjelmoinnilla.

Lähteet

- Appel, A. W. (1994). Axiomatic bootstrapping: A guide for compiler hackers. *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, 16(6):1699–1718.
- Backus, J. W., Beeber, R. J., Best, S., Goldberg, R., Herrick, H. L., Hughes, R. A., Mitchell, L. B., Nelson, R. A., Nutt, R., Sayre, D., Sheridan, P. B., Stern, H., and Ziller, I. (1956). *The Fortran automatic coding system for the IBM 704 EDPM*. IBM Corporation.
- Bauer, F. L., De Remer, F. L., Griffiths, M., Hill, U., Horning, J. J., Koster, C. H. A., McKeeman, W. M., Poole, P. C., and Waite, W. M. (1974). *Compiler Construction: An Advanced Course*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bratman, H. (1961). An alternate form of the UNCOL Diagram. *Commun. ACM*, 4(3):142.
- Brown, P. J. (1972). Levels of language for portable software. *Commun. ACM*, 15(12):1059–1062.
- Church, A. (1936). An unsolvable problem of elementary number theory. *American Journal of Mathematics*, 58(2):345–363.
- Conway, M. E. (1958). Proposal for an UNCOL. *Commun. ACM*, 1(10):5–8.
- Curry, H. (1950). *A program composition technique as applied to inverse interpolation*. U.S. Naval Ordnance Laboratory.
- Earley, J. and Sturgis, H. (1970). A formalism for translator interactions. *Commun. ACM*, 13(10):607–617.
- Free Software Foundation, Inc. (2016). Cross-compilation. https://www.gnu.org/savannah-checkouts/gnu/automake/manual/html_node/Cross_002dCompilation.html. Accessed: 2016-12-02.
- Goldstine, H. H. and von Neumann, J. (1947). *Planning and coding problems for an electronic computing instrument*. Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey.
- Guilan, D., Jinlan, T., Suqin, Z., Weidu, J., and Jun, D. (2002). Retargetable cross compilation techniques: Comparison and analysis of GCC and Zephyr. *SIGPLAN Not.*, 37(6):38–44.

- Helsingin yliopisto, Tietojenkäsittelytieteen laitos (1991). Ttk91 reference. https://www.cs.helsinki.fi/group/titokone/ttk91_ref_en.html. Accessed: 2016-10-21.
- IBM Corporation (1954). *Specifications for the IBM Mathematical FORMula TRANslating System, FORTRAN*. IBM Corporation.
- Knuth, D. and Pardo, L. (1976). *The early development of programming languages*. Stanford University.
- Mogensen, T. (2010). *Basics of Compiler Design*. lulu.com.
- Reynolds, J. H. (2003). Bootstrapping a self-compiling compiler from machine X to machine Y. *J. Comput. Sci. Coll.*, 19(2):175–181.
- Rosen, S. (1964). Programming systems and languages: A historical survey. In *Proc. AFIPS '64 (Spring)*, pages 1–15. ACM.
- Salomon, D. (1993). *Assemblers and Loaders*. Ellis Horwood Ltd.
- Speetjens, J. K. (1976). Intermediate language for minicomputer cross-compilation. In *Proc. ACM-SE 14*, pages 15–18. ACM.
- Steel, Jr., T. B. (1961). A first version of UNCOL. In *Papers Presented at IRE-AIEE-ACM '61 (Western)*, pages 371–378. ACM.
- Strong, J., Wegstein, J., Tritter, A., Olsztyn, J., Mock, O., and Steel, T. (1958). The problem of programming communication with changing machines: A proposed solution. *Commun. ACM*, 1(8):12–18.
- Turing, A. M. (1936–1937). On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, s2-42(1):230–265.