hyväksymispäivä arvosana

arvostelija

Mutaatiotestaus oliojärjestelmissä

Eveliina Pakarinen

Tutkielma
HELSINGIN YLIOPISTO
Tietojenkäsittelytieteen laitos

Helsinki, 16. marraskuuta 2015

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

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

Tekijä — Författare — Author
Eveliina Pakarinen

Työn nimi — Arbetets titel — Title

Mutaatiotestaus oliojärjestelmissä

Oppiaine — Läroämne — Subject
Tietojenkäsittelytiede

Työn laji — Arbetets art — Level	Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages
Tutkielma	16. marraskuuta 2015	19

Tiivistelmä — Referat — Abstract

Olioperustaisen ohjelmoinnin kehityksen myötä testausmenetelmiä on sopeutettu uusiin vaatimuksiin, joita olio-ohjelmoinnin erityispiirteet ovat tuoneet mukanaan. Mutaatiotestaus on virheperustainen testausmenetelmä, jonka avulla ohjelmiston olemassa olevien testien laatua voidaan kehittää ja parantaa. Mutaatiotestaus esiteltiin ensimmäistä kertaa jo 1970-luvulla.

Perinteisesti mutaatiotestausta on käytetty testien kehittämisessä proseduraalisella ohjelmoinnilla tuotetuille ohjelmille. Olioperustaisten ohjelmien mutaatiotestaukseen on kuitenkin kehitetty luokkamutaatioksi kutsuttu mutaatiotestausmenetelmä. Mutaatiotestaukseen liittyy ratkaisemattomia ongelmia, jotka estävät mutaatiotestauksen laajamittaisen käytön osana ohjelmistotestausta.

ACM Computing Classification System (CCS):
D.2.4 [Software/Program Verification]
D.2.5 [Testing and Debugging]
D.3.3 [Language Constructs and Features]

Avainsanat — Nyckelord — Keywords
mutaatiotestaus, oliojärjestelmät, Java

Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited

Muita tietoja — Övriga uppgifter — Additional information

Sisältö

1 Johdanto

Perinteisiä ohjelmistojen testausmenetelmiä on olioperustaisen ohjelmoinnin kehityksen myötä sopeutettu uusiin olio-ohjelmoinnin mukana tuleviin haasteisiin. Olio-ohjelmoinnin avulla voidaan ratkaista joitakin proseduraalisen ohjelmoinnin ongelmia [MP08, s. 86]. Olio-ohjelmoinnin piirteet, kuten kapselointi ja perintä, aiheuttavat kuitenkin uusia ongelmia.

Ohjelmistokehitysprosessissa testausta voidaan käyttää ohjelmistossa olevien vikojen havaitsemiseen jo kehitysvaiheen aikana. Testauksen avulla voidaan myös parantaa ohjelmiston laatua ja varmistaa, että ohjelma toimii sille asetettujen vaatimusten mukaisesti.

Testaukseen liittyy kuitenkin myös rajoituksia. Testauksen avulla ei esimerkiksi voi aina todistaa ohjelmiston oikeellisuutta [Bin99, s. 58]. Lisäksi epävarmuutta liittyy käytettävän testausjärjestelmän oikeellisuuden ja luotettavuuden varmistamiseen.

Yksi menetelmä ohjelmiston testien laadun tutkimiseen ja parantamiseen on mutaatiotestauksen käyttö osana ohjelmiston testausprosessia. Mutaatiotestauksessa tavoitteena on tutkia, ovatko ohjelmistoa varten tehdyt testit laadukkaita ja havaitaanko niillä kattavasti ohjelmistossa mahdollisesti esiintyviä vikoja ja ongelmia [JH11, s. 649].

Mutaatiotestauksen periaatteena on simuloida ohjelmoijien tekemiä yleisiä ohjelmointivirheitä muokkaamalla ohjelmiston alkuperäistä lähdekoodia [JH11, s. 649]. Mutaatiotestauksessa lähdekoodista muodostetaan muunnettuja versioita eli mutantteja.

Perinteisesti mutaatiotestausta on käytetty testien kehityksessä proseduraalisella ohjelmoinnilla tuotetuille ohjelmille. Olioperustaisen ohjelmoinnin kehittyessä mutaatiotestausta on sopeutettu uusiin vaatimuksiin. Luokkamutaation avulla mutaatiotestausta voidaan soveltaa olio-ohjelmia testaavien testien laadun varmistamiseen [KCM00].

Vaikka mutaatiotestausta voidaan käyttää apuna ohjelmiston olemassa olevien testien kehittämisessä, liittyy mutaatiotestausmenetelmän käyttöön myös ratkaisemattomia ongelmia, jotka estävät mutaatiotestauksen laajaalaisen käytön [JH11, s. 652]. Mutaatiotestauksen suoritus vaatii paljon laskentatehoa, mikä on yksi ongelmista. Lisäksi mutaatiotestausprosessissa

ihmiseltä vaadittava työpanos on suuri.

Mutaatiotestausta on tutkittu paljon [JH11, s. 649]. Tutkimuksen avulla on etsitty keinoja ratkaista mutaatiotestaukseen liittyviä ongelmia, jotta mutaatiotestaus voidaan muuttaa käytännölliseksi testausmenetelmäksi.

2 Testaus oliojärjestelmissä

Olioperustaisen ohjelmoinnin kehityksen myötä klassisia ohjelmistojen testausmenetelmiä on sopeutettu mahdollistamaan *oliojärjestelmien* (*object oriented systems*) kattava ja laadukas testaaminen. Vaikka olioperustainen ohjelmointi ratkaisee joitakin proseduraalisen ohjelmoinnin suunnittelu- ja toteutusongelmia, olio-ohjelmoinnin mukana tulevat uudet haasteet vaativat uusien testaus- ja analysointimenetelmien kehittämistä [MP08, s. 86].

2.1 Rooli

IEEE:n standardin mukaan ohjelmointivirheen (*error*) aiheuttamaa, ohjelmiston lähdekoodiin päässyttä virheellistä kohtaa kutsutaan viaksi (*fault*) [IEE10, s. 5]. Lähdekoodissa oleva vika saattaa ohjelman suoritusaikana ilmetä virheenä (*failure*). Virhe ilmenee, kun ohjelma ei **(ohjelman)** suorituksen aikana toimi odotetulla tavalla. **(Tässä tutkielmassa käytetään IEEE:n standardin mukaisia määritelmiä vialle ja virheelle.)**

Testausta käytetään ohjelmistokehityksessä ohjelmiston laadun varmistamiseen ja auttamaan lähdekoodissa esiintyvien vikojen havaitsemisessa jo kehitysvaiheen aikana. Ohjelmistojen testaamisen ensisijainen tavoite on siis paljastaa vikoja, joiden havaitseminen muiden laadunvarmistusmenetelmien avulla olisi työlästä tai mahdotonta [Bin99, s. 59]. Testauksen avulla pyritään myös varmistamaan, että ohjelma toimii sille asetettujen vaatimusten mukaisesti.

Olio-ohjelmoinnissa testaukseen tuovat haasteita olio-ohjelmien erityispiirteet, joita ovat muun muassa kapselointi, perintä, dynaaminen sidonta ja polymorfismi [MP08, s. 86].

2.2 Tasot

Ohjelmistoja voidaan testata usealla tasolla. Testauksen tasoja ovat yksikkö-, integraatio- ja järjestelmätasot. Tasot muodostuvat yhdestä tai useammasta ohjelman komponentista, joita tason testeillä testataan [Bin99, s. 45]. Komponentti voi olio-ohjelmissa olla esimerkiksi yksittäinen metodi tai luokka, ohjelman luokkien välinen rajapinta tai jo valmis ohjelmisto.

Alimmalla testauksen tasolla *yksikkötestauksessa* (*unit testing*) testataan ohjelman pienimpiä suoritettavissa olevia komponentteja [Bin99, s. 45]. Olio-ohjelmissa näitä komponentteja ovat yksittäiset metodit ja oliot.

Yksikkötestauksesta seuraava taso ylöspäin on *integraatiotestaus* (*integration testing*), jossa tarkastellaan järjestelmän tai sen osien yhteistoimintaa [Bin99, s. 45]. Integraatiotestauksessa testataan siis järjestelmän osien välisiä rajapintoja ja osien keskinäistä kommunikointia. Olio-ohjelmissa luokkien muodostumisesta perinnän avulla ja luokkien koostumisesta toisten luokkien olioista seuraa, että integraatiotestaukselle on olio-ohjelmoinnissa tarvetta jo ohjelmoinnin alkuvaiheessa.

Valmista integroitua sovellusta testataan *järjestelmätestauksen* (*system testing*) avulla [Bin99, s. 45]. Tällä testauksen tasolla keskitytään vain valmiissa sovelluksessa esiintyvien piirteiden testaamiseen. Testauksen kohteena voi olla esimerkiksi sovelluksen toiminnallisuus, suorituskyky tai sovelluksen kestämä kuormitus [Bin99, s. 45].

2.3 Suunnittelu

Testien suunnitteluun ja kehittämiseen voidaan käyttää useita menetelmiä. Testausmenetelmän avulla kuvataan näkökulmaa, josta esimerkiksi ohjelman lähdekoodia tarkastellaan testejä kehitettäessä [Bin99, s. 51]. Ohjelman sisäisen rakenteen tai ulkoisen toiminnallisuuden tuntemusta voidaan käyttää testausmenetelmissä apuna uusia testejä kehitettäessä. Lisäksi olemassa olevia testejä voidaan kehittää testausmenetelmien avulla.

Ohjelman sisäisen rakenteen eli lähdekoodin tuntemukseen perustuvaa testausmenetelmää kutsutaan *white box -testaukseksi* [Bin99, s. 52]. White box -testausta voidaan käyttää esimerkiksi yksikkötestauksessa apuna testien suunnittelussa, sillä lähdekoodin tuntemus auttaa kehittämään testejä

yksittäisille metodeille ja olioille.

Black box -testaukseksi eli *funktionaaliseksi testaukseksi* kutsutussa testausmenetelmässä testejä suunnitellaan ohjelmiston toiminnallisuuden tuntemuksen avulla [Bin99, s. 52]. Koska valmiin sovelluksen piirteitä testattaessa tutkitaan myös sovelluksen ulkoista toiminnallisuutta, on black box -testausmenetelmästä apua suunniteltaessa testejä esimerkiksi järjestelmätestaukseen.

Gray box - eli *hybriditestauksessa* yhdistetään white box - ja black box -testausmenetelmien piirteitä [Bin99, s. 52]. Sekä white box -testausta että black box -testausta voidaan käyttää testien suunnittelussa useilla testauksen tasoilla joko erikseen tai molempien piirteitä yhdistäen.

Testausmenetelmää, jossa ohjelman lähdekoodiin lisätään vikoja, kutsutaan *virheperustaiseksi testausmenetelmäksi* (*fault-based testing*) [Bin99, s. 52]. Esimerkkinä virheperustaisesta testausmenetelmästä on mutaatiotestaus, jonka avulla tutkitaan testien kykyä havaita vikoja ohjelmiston lähdekoodissa [DLS78, s. 36]. Testaukseen liittyvät tavoitteet eroavat mutaatiotestauksessa ja perinteisessä ohjelmistotestauksessa toisistaan. Perinteisessä testauksessa keskitytään kehittämään ohjelmiston laatua, kun taas mutaatiotestauksessa kehityksen kohteena ovat olemassa olevat testit ja niiden laatu.

2.4 Rajoitukset

Yksi testaukseen liittyvistä rajoituksista on, että testauksen avulla ei voi aina todeta ohjelmiston oikeellisuutta. Jotta oikeellisuus voidaan todistaa, vaaditaan, että ohjelman oikea toiminta testataan kaikilla mahdollisilla syötteillä ja niiden kombinaatioilla. Ohjelman oikeellisuuden todistaminen vastaa siis ohjelman **kattavaa/täydellistä** testaamista. Kattava testaaminen on kuitenkin käytännössä usein mahdotonta toteuttaa muille kuin triviaaleille ohjelmille [Bin99, s. 58]. Oikellisuuden todistamiseen liittyen Edsger Dijkstra totesikin: *"Program testing can be used to show the presence of bugs, but never to show their absence!"* [DDH72, s. 6].

Testien *odotettujen tulosten* (*expected results*) määrittäminen on tärkeä osa testien suunnittelua, sillä ilman odotettuja tuloksia kattava automaat-

tinen testaaminen ei ole mahdollista [Bin99, s. 917]. *Testioraakkeliksi* (*test oracle*) kutsutaan lähdettä, joka määrittelee testien odotetut tulokset [Bin99, s. 917]. Testioraakkeli voi olla esimerkiksi ohjelman vaatimusmäärittely, lista esimerkkikäyttötapauksista tai ohjelmoijan tieto siitä, kuinka ohjelman tulisi toimia [Bin99, s. 918].

Jos testien suorituksesta saatujen *toteutuneiden tulosten* (*actual results*) vertailukohdaksi ei ole olemassa luotettavia odotettuja tuloksia, toteutuneiden tulosten tulkinta on epävarmaa [Bin99, s. 58]. Tällöin toteutuneista tuloksista ei voi luotettavasti päätellä, menivätkö testit läpi vai eivät. Täydellisen testioraakkelin kehittäminen on kuitenkin haastavaa ja joissain tapauksissa mahdotonta [Bin99, s. 58].

Jotta testauksessa voidaan selvittää, toimiiko testattava ohjelma halutulla tavalla, testauksen tulosten vertailukohtana on käytettävä testattavan järjestelmän toiminnallisuudelle asetettuja vaatimuksia [Bin99, s. 58]. Jos testejä kehitettäessä toteutuneiden tulosten vertailukohtana käytetään virheellisiä tai puutteellisia vaatimuksia, saattavat kehitetyt testit olla harhaanjohtavia. Toiminnallisuusvaatimusten laadun arvioimiseen liittyy kuitenkin haasteita. Testauksen avulla ei voi **nimittäin suoraan** varmistaa, ovatko toiminnallisuusvaatimukset kunnollisia [Bin99, s. 58].

3 Mutaatiotestaus

Testaukseen sisältyvien rajoitusten lisäksi testaukseen liittyy myös epävarmuutta käytettävän testausjärjestelmän oikeellisuudesta ja oikeellisuuden varmistamisesta [MW78, s. 209]. Tämä herättää kysymyksen siitä, kuka voi ”valvoa valvojia” eli kuinka varmistetaan ohjelmiston testien laadukkuus. Yksi menetelmä testien kehittämiseen ja niiden laadun parantamiseen on *mutaatiotestaus*. Mutaatiotestauksen avulla voidaan mitata, kuinka tehokkaasti ohjelmiston testeillä havaitaan ohjelmistossa esiintyviä vikoja [JH11, s. 649].

3.1 Historia ja teoreettinen perusta

Mutaatiotestauksesta kirjoitettiin ensimmäistä kertaa jo 1970-luvulla. Richard DeMillon, Richard Liptonin ja Frederick Saywardin artikkeli [DLS78]

vuodelta 1978 on yksi ensimmäisistä uraauurtavista mutaatiotestausta esittelevistä artikkeleista. Mutaatiotestauksen tutkimus on lisääntynyt vuosien kuluessa, ja erityisesti 2000-luvulla uusia tuloksia on julkaistu paljon [Off11, s. 1102]. Tutkimuksessa suuntana on ollut etsiä keinoja, joilla mutaatiotestaus voidaan muuttaa käytännölliseksi testausmenetelmäksi [JH11, s. 649].

historiasta ehkä lisää ja tutkimuksesta

Mutaatiotestaus perustuu kahteen hypoteesiin: the Competent Programmer Hypothesis ja the Coupling Effect (Hypothesis).

Lisää juttua siitä, että mutaatiotestaus kasvattaa testitkattavuutta.

Tyyliin: Tietyillä mutaatio-operaattoreilla generoitujen mutanttien tappaminen saattaa myös pakotta tiettyjen "polkujen"läpikäyntiin. Tällöin, kun ohjelmiston testejä kehitetään mutaatiotestauksen avulla, sen lisäksi että testien kyky havaita vikoja kasvaa saadaan testien "testikattavuutta"coverage, branch yms. kasvatettua.

3.2 Perinteinen mutaatiotestausprosessi

Perinteisen mutaatiotestausprosessin syötteinä käytetään alkuperäistä ohjelmistoa ja ohjelmistoa testaavia testejä. Mutaatiotestausprosessin aikana olemassa olevien testien laatua kehitetään vaiheittain. Perinteisen mutaatiotestausprosessin työvaiheet on esitelty kuvassa 1. Työvaiheet on merkitty kuvaan sinisillä laatikoilla. Työvaiheiden aikana käytettäviä resursseja, kuten esimerkiksi ohjelmiston lähdekoodia ja testituloksia, kuvataan vihreillä ja keltaisilla laatikoilla.

Perinteisessä mutaatiotestausprosessissa ensimmäinen työvaihe on käsitellä ohjelmiston alkuperäistä lähdekoodia *mutaatio-operaattoreilla*, jotka muuntavat koodia muodostaen siitä viallisia versioita [MHK06, s. 869]. Näitä viallisia ohjelmakoodin versioita kutsutaan *mutanteiksi*. Mutaatio-operaattorit kuvaavat algoritmeja, joiden avulla lähdekoodia käsitellään koodin muuntamisen aikana.

Mutanttien generoinnin jälkeen ohjelmiston alkuperäiset testit suoritetaan muuntamattomalle lähdekoodille [JH11, s. 652]. Tavoitteena on varmistaa, että testit voidaan suorittaa alkuperäiselle ohjelmalle ilman virheitä. Jos testit

eivät mene läpi, eli ohjelmaa suoritettaessa havaitaan virheitä, ohjelmistossa olevat viat korjataan ennen kuin mutaatiotestausta jatketaan.

Seuraavaksi testit suoritetaan jokaisen elävän mutantin kohdalla [OU01, s. 35]. Kun testit suoritetaan mutanttien kohdalla, tavoitteena on selvittää, havaitaanko testien avulla lähdekoodiin tehdyt muutokset.

Testien suorituksen jälkeen alkuperäiselle lähdekoodille ja mutanteille suoritettujen testien tuloksia verrataan toisiinsa. Testituloksia vertailtaessa voidaan päästä kahteen lopputulokseen [DLS78, s. 36]. Alkuperäiselle muuntamattomalle lähdekoodille suoritettujen testien tulos voi:

1. erota yhdelle mutantille suoritettujen testien tuloksesta tai
2. olla sama kuin yhdelle mutantille suoritettujen testien tulos.

Tapauksessa 1. alkuperäiset testit eivät ole menneet läpi mutantin kohdalla. Tämä tarkoittaa, että mutantti on tapettu eli lähdekoodiin tehty muutos on havaittu [DLS78, s. 36].

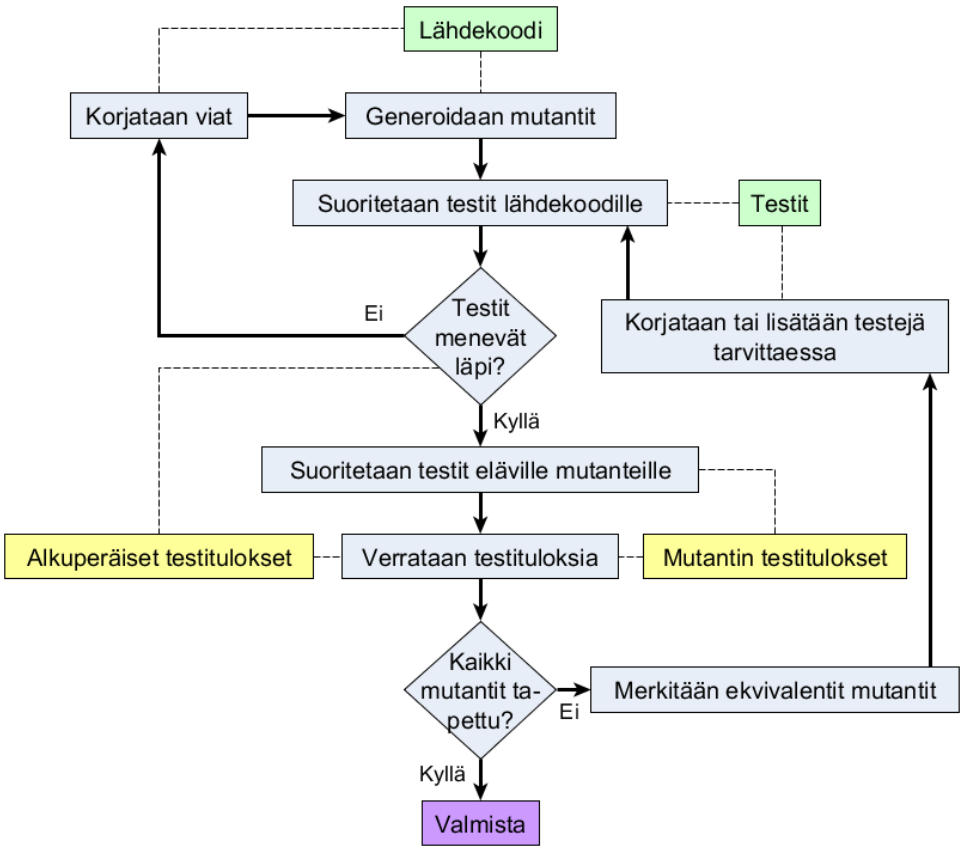
Tapauksessa 2. alkuperäiset testit ovat menneet läpi mutantin kohdalla eli mutantti on jäänyt eloon. Mutantin jäämiselle eloon on kaksi vaihtoehtoista selitystä [DLS78, s. 36]. Ensimmäinen selitys on, että alkuperäiset testit eivät ole riittävän hyvät, jotta niiden avulla voidaan havaita lähdekoodiin tehty muutos. Toinen selitys on, että mutantin toiminta ei eroa alkuperäisen ohjelman toiminnasta eli kyseessä on *ekvivalentti mutantti*. Ekvivalentti mutantti on syntaktisesti erilainen kuin alkuperäinen ohjelma mutta toiminnaltaan se on samanlainen alkuperäisen ohjelman kanssa [JH11, s. 652].

Jos testituloksia verrattaessa huomataan, että mutantteja on jäänyt eloon, seuraava vaihe mutaatiotestausprosessissa on etsiä ja merkitä ekvivalentit mutantit [OU01, s. 36]. Tämän jälkeen testien laatua voidaan kehittää joko muokkaamalla olemassa olevia testejä tai lisäämällä uusia testejä, jotta eloon jääneet mutantit saadaan tapettua.

Mutaatiotestausprosessi tuottaa lopputuloksena *mutaatiopistemäärän* (*mutation adequacy score*), jonka avulla voi arvioida ohjelmiston testien laadukkuutta ja kykyä havaita vikoja lähdekoodissa [JH11, s. 652]. Mutaatiopistemäärä MP lasketaan kaavalla

$$MP = \frac{T}{K - E} \tag{1}$$

missä T on tapettujen mutanttien määrä, K on kaikkien mutanttien määrä ja E on ekvivalenttien mutanttien määrä. Mutaatiopistemäärän maksimiarvo 1 saavutetaan, kun testeillä saadaan tapettua kaikki mutantit [OU01, s. 36]. Perinteinen mutaatiotestausprosessi päättyy, kun kaikki ei-ekvivalentit mutantit on tapettu. Tämä on merkitty kuvaan 1 violetilla laatikolla.



Kuva 1: Perinteinen mutaatiotestausprosessi.

3.3 Uusi mutaatiotestausprosessi

Perinteiseen mutaatiotestausprosessiin sisältyy useita manuaalista työtä vaativia työvaiheita. Kuvassa 1 esitellyssä perinteisessä mutaatiotestausprosessissa manuaalista työtä vaativat työvaiheet ovat alkuperäisten testitulosten tarkastaminen, lähdekoodin vikojen korjaaminen, ekvivalenttien mutanttien merkitseminen ja uusien testien lisääminen tai olemassa olevien testien

kehittäminen.

Kuvan 1 kaaviosta nähdään, että mutaatiotestaus ei ole suoraviivainen prosessi, vaan prosessin suoritus saattaa haarautua ja palata takaisin jo suoritettuihin työvaiheisiin. Haarautumista tapahtuu esimerkiksi silloin, kun kaikkia mutantteja ei ole saatu tapettua tai testit eivät ole menneet läpi. Mutaatiotestausprosessiin muodostuu haarautumisesta johtuen silmukoita. Mutaatiotestausprosessin pääsilmukkaan kuuluu testien suoritus alkuperäiselle lähdekoodille, testitulosten tarkastus, testien suoritus mutanteille, testitulosten vertailu, ekvivalenttien mutanttien merkitseminen ja lopuksi uusien testien lisääminen tai olemassa olevien testien kehittäminen.

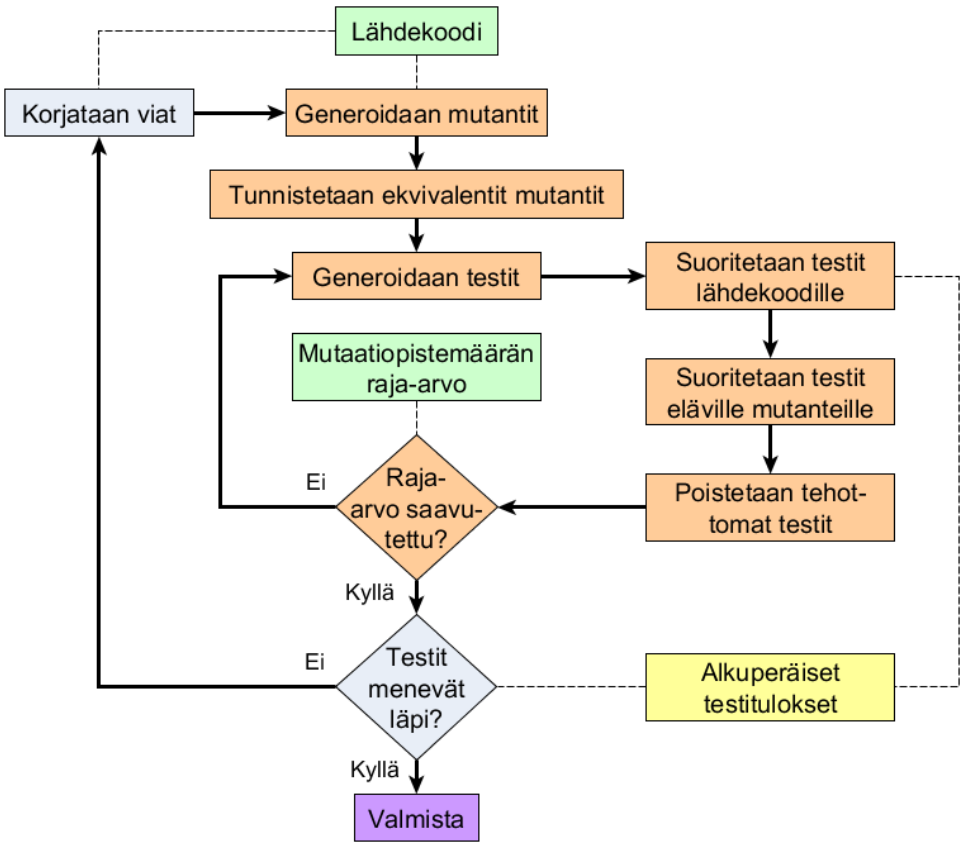
Jotta perinteistä mutaatiotestausprosessia voidaan tehostaa, manuaaliset työvaiheet on poistettava mutaatiotestausprosessin pääsilmukasta [OU01, s. 41]. Tällöin perinteisen mutaatiotestausprosessin tilalle muodostuu uusi mutaatiotestausprosessi, jossa osa työläistä manuaalisista työvaiheista suoritetaan automaattisesti. Automatisoitavia työvaiheita ovat ekvivalenttien mutanttien tunnistaminen ja uusien testien generointi ja kehittäminen. Ainoaksi merkittäväksi manuaaliseksi työvaiheeksi uudessa prosessissa jää tarkistaa, ovatko alkuperäiselle lähdekoodille suoritetut testit menneet läpi.

Automatisoinnin lisäksi uudessa mutaatiotestausprosessissa työvaiheiden suoritusjärjestys muuttuu [OU01, s. 40]. Manuaalinen testitulosten tarkastusvaihe siirretään pois mutaatiotestauksen pääsilmukasta suoritettavaksi pääsilmukasta poistuttaessa. Lisäksi ekvivalenttien mutanttien tunnistaminen suoritetaan ennen pääsilmukkaan siirtymistä.

Perinteisessä mutaatiotestausprosessissa suoritus päättyy, kun mutaatiopistemäärä saavuttaa arvon 1. Uudessa mutaatiotestausprosessissa riittävä mutaatiopistemäärä määritellään pistemäärälle asetettavan raja-arvon avulla. Uudessa prosessissa pääsilmukan työvaiheita ovat testien generointi, suoritus ja kehittäminen. Testejä kehitetään poistamalla tehottomat testit eli testit, jotka eivät tappaneet yhtään mutanttia. Lisäksi pääsilmukassa tarkastetaan, onko mutaatiopistemäärän raja-arvo saavutettu.

Työvaiheiden automatisointi ja niiden suoritusjärjestyksen muuttaminen tekevät uudesta mutaatiotestausprosessista tehokkaamman verrattuna perinteiseen mutaatiotestausprosessiin [OU01, s. 41]. Kuvassa 2 on esitelty uusi mutaatiotestausprosessi. Automatisoidut työvaiheet on merkitty ku-

vaan oransseilla laatikoilla ja manuaaliset työvaiheet on merkitty sinisillä laatikoilla. Prosessissa käytettäviä resursseja kuvataan vihreillä ja keltaisilla laatikoilla.



Kuva 2: Uusi mutaatiotestausprosessi [OU01, s. 41].

4 Mutaatiotestaus oliojärjestelmissä

Kappaleen estittelyteksti tähän. **Kuinka pitkä tämän on oltava?**

4.1 Mutaatio-operaattorit

Mutaatio-operaattorit ovat tärkeässä asemassa mutaatiotestauksessa, sillä mutaatiotestauksen tehokkuus riippuu siitä, minkälaisia vikoja mutaatio-operaattoreilla luodaan lähdekoodiin [MKO02, s. 352]. Perinteisesti mutaa-

tiotestausta on hyödynnetty proseduraalisessa ohjelmoinnissa, minkä vuoksi myös mutaatio-operaattorit on kehitetty tukemaan suurinta osaa proseduraalisten ohjelmointikielten piirteistä [MKO02, s. 352].

Olioperustaisiin ohjelmointikieliin sisältyy kuitenkin uusia ominaisuuksia, joiden käytöstä aiheutuu erilaisia virheitä/vikoja verrattuna proseduraalisessa ohjelmoinnissa esiintyviin virheisiin/vikoihin. Uusien virheiden/vikojen ilmeneminen olio-ohjelmissa on johtanut uusien olioperustaisten mutaatio-operaattorien kehittämiseen.

Olioperustaisten ohjelmien mutaatiotestaukseen käytettävää menetelmää kutsutaan *luokkamutaatioksi* [KCM00]. Luokkamutaatiomenetelmän kehittivät Sunwoo Kim, John Clark ja John McDermid Java-ohjelmointikielen käytöstä aiheutuvien vikojen pohjalta [KCM00]. Heidän kehittämiensä *luokkamutaatio-operaattorien* avulla mutaatiotestausmenetelmää voidaan soveltaa Java-ohjelmointikielellä toteutettuihin olioperustaisiin ohjelmiin.

Kimin, Clarkin ja McDermidin kehittämät luokkamutaatio-operaattorit ovat toimineet lähtökohtana myös muiden tutkijoiden luokkamutaatiotutkimuksessa ja uusien luokkamutaatio-operaattorien kehittämisessä. Yu Seung Ma, Yong Rae Kwon ja Jeff Offutt kehittivät vuonna 2002 Java-ohjelmointikieltä varten joukon uusia luokkamutaatio-operaattoreita, jotka perustuivat aiemmin kehitettyihin operaattoreihin [MKO02, s. 352]. Heidän tavoitteenaan oli parantaa ja kehittää olemassa olevia luokkamutaatio-operaattoreita, jotta luokkien välisten suhteiden testaaminen olisi mahdollista mutaatiotestauksella [MKO02, s. 362].

Taulukossa 1 on listattu Man, Kwonin ja Offuttin kehittämät luokkamutaatio-operaattorit. Operaattorit on jaettu kuuteen ryhmään. Ryhmät perustuvat niihin olio-ohjelmointikielen piirteisiin, joita ryhmän operaattoreilla muunnetaan [MKO02, s. 355].

Mutaatio-operaattorien avulla kuvataan algoritmeja, joilla lähdekoodia muokataan mutantteja muodostettaessa. Esimerkiksi JSC-operaattori lisää ilmentymämuuttujiin *static*-määreen tehden niistä luokkamuuttujia tai vastaavasti poistaa luokkamuuttujista *static*-määreen tehden niistä ilmentymämuuttujia. JSC-operaattorin ja myös muiden Man, Kwonin ja Offuttin kehittämien luokkamutaatio-operaattorien nimet ja kuvaukset voi nähdä taulukosta 1. Taulukosta nähdään myös, mihin ryhmiin luokkamutaatio-

operaattorit kuuluvat. Tarkemmat tiedot operaattorien toiminnasta löytyvät **Man, Kwonin ja Offuttin artikkelista "Inter-class mutation operators for Java"** [**MKO02**].

Ryhmä	**Operaattori**	**Kuvaus**
Kapselointi	AMC	Access modifier change
Perintä	IHD	Hiding variable deletion
	IHI	Hiding variable insertion
	IOD	Overriding method deletion
	IOP	Overridden method calling position change
	IOR	Overridden method rename
	ISK	*super* keyword deletion
	IPC	Explicit call of a parent's constructor deletion
Polymorfismi	PNC	*new* method call with child class type
	PMD	Member variable declaration with parent class type
	PPD	Parameter variable declaration with child class type
	PRV	Reference assignment with other compatible type
Metodin kuormitus	OMR	Overloading method contents change
	OMD	Overloading method deletion
	OAO	Argument order change
	OAN	Argument number change
Javan erityispiirteet	JTD	*this* keyword deletion
	JSC	*static* modifier change
	JID	Member variable initialization deletion
	JDC	Java-supported default constructor create
Yleiset ohjelmointivirheet	EOA	Reference assignment and content assignment replacement
	EOC	Reference comparison and content comparison replacement
	EAM	Accessor method change
	EMM	Modifier method change

Taulukko 1: Luokkamutaatio-operaattoreita Javalle [MKO02].

4.2 Automatisoidut mutaatiotestausjärjestelmät

Mutaatiojärjestelmät opetuksessa: PIT.

Mutaatiojärjestelmä tutkimuksessa: MuJava.

5 Mutaatiotestauksen haasteet

Vaikka mutaatiotestausta voidaan käyttää ohjelmiston olemassa olevien testien kehittämiseen ja testien laadun parantamiseen, ei mutaatiotestausmenetelmän käyttö ole ongelmatonta. Mutaatiotestaukseen liittyy haasteita ja ratkaisemattomia ongelmia, jotka estävät menetelmän käyttämisen laaja-alaisesti osana testausprosessia [JH11, s. 652].

Mutaatiotestaukseen on kuitenkin kehitetty menetelmiä, joilla mutaatiotestauksen ongelmia voidaan ratkaista osittain **[?, s.]**. Osittaisten ratkaisujen avulla mutaatiotestausprosessi voidaan automatisoida [JH11, s. 653]. **With existing advances in mutation testing the process of mutation testing can be automated.** Automatisoitu uusi mutaatiotestausprosessi on esitelty kuvassa 2 sivulla 10. Uudessa mutaatiotestausprosessissa automatisoitujen työvaiheiden toteutuksessa voidaan käyttää menetelmiä, joiden avulla mutaatiotestauksen haasteita on yritetty ratkaista.

5.1 Ekvivalentit mutantit

Ekvivalenttien mutanttien tunnistaminen on yksi mutaatiotestaukseen liittyvistä ongelma-alueista. Ekvivalentit mutantit ovat mutantteja, jotka ovat toiminnaltaan samanlaisia kuin alkuperäinen ohjelma, mutta syntaktisesti erilaisia alkuperäisen ohjelman kanssa [JH11, s. 652]. Ekvivalentteja mutantteja muodostuu, kun alkuperäistä lähdekoodia käsitellään mutaatio-operaattoreilla.

Taulukossa 1 esitelty mutaatio-operaattori IHI lisää aliluokkaan kentän, joka peittää yliluokalta perityn kentän. Jos peittävä kentä on yliluokassa määritelty yksityiseksi, kaikki IHI-operaattorilla tuotetut mutantit ovat ekvivalentteja mutantteja [OMK06, s. 80]. Esimerkissä 1 IHI-operaattorilla on muodostettu mutantti, jossa `Kauppa`-luokan aliluokaan `Elainkauppa` on lisätty peittävä kenttä `osoite`. `Elainkauppa`-luokassa yliluokan `osoite`-muuttuja saadaan käyttöön yliluokan metodilla `getOsoite()`. Peittävän kentän `osoite` lisääminen ei siis muuta luokan `Elainkauppa` toimintaa, joten kyseessä on ekvivalentti mutantti.

Esimerkki 1

```
public class Kauppa {
   private String osoite;
   public void setOsoite(String uusiOsoite){
      this.osoite = uusiOsoite;
   };
   public String getOsoite(){
      return this.osoite;
   };
};

public class Elainkauppa extends Kauppa {
   private String osoite; //IHI operaattorin lisaama muuttuja
   private String erikoisala = "kissanruuat";
   public String toString(){
      return "Liikkeen osoite on " + getOsoite() +
             " ja sen erikoisalana on " + this.erikoisala;
   };
};
```

On todistettu, että ekvivalenttien mutanttien tunnistaminen **(algoritmisesti)** yleisessä tapauksessa on ratkaisematon ongelma [OMK06, s. 79]. Ekvivalenttien mutanttien tunnistamiseksi on kuitenkin kehitetty heuristiikkoja, joiden avulla ongelma voidaan ratkaista osittain. Tunnistamisongelma on herättänyt runsaasti teoreettista kiinnostusta, ja mahdollisia tunnistamistekniikoita on tutkittu paljon [JH11, s. 657].

Yksi vaihtoehto ekvivalenttien mutanttien tunnistamisongelman ratkaisemiseksi on estää ekvivalenttien mutanttien syntyminen mutanttien generointivaiheessa [OMK06, s. 80]. **Muita vaihtoehtoja ovat Compiler optimization techniques, algorithms in Mothra, infeasible constraints ideaan perustuva väline, Program slicing.**

Heuristiikkojen (ja laskennan) avulla voidaan tunnistaa vain osa ekvivalenteista mutanteista. Jos kaikki ekvivalentit mutantit halutaan tunnistaa, tunnistaminen on suoritettava manuaalisesti tutkimalla mutanttia ja vertaamalla mutantin toimintaa alkuperäisen ohjelmiston toimintaan. **Ekvi-**

valenttien mutanttien tunnistaminen manuaalisesti lisää kuitenkin mutaatiotestaukseen vaadittavaa työmäärää.

5.2 Tehokkuusongelmat

Tehokkuuteen liittyvät ongelmat ovat toinen mutaatiotestauksen ongelma-alueista. Tehokkuusongelmia esiintyy erityisesti silloin, kun jokaisen mutantin kohdalla suoritetaan kaikki ohjelmistoa varten tehdyt testit [JH11, s. 652]. Testien suoritus jokaisen mutantin kohdalla hidastaa mutaatiotestausprosessia ja vaatii paljon laskentatehoa. Tehokkuusongelman ratkaisemiseksi on kuitenkin esitetty useita ratkaisuehdotuksia [JH11, s. 653]. Ratkaisuehdotuksia ovat esimerkiksi generoitujen mutanttien määrän vähentäminen ja mutanttien ja testien suorituskustannusten pienentäminen.

Ratkaisuehdotukset mutaatiotestauksen vaatiman laskentatehon **(computational cost)** vähentämiseksi on jaettu kolmeen osa-alueeseen [OU01, s. 37]. Osa-alueisiin sisältyy menetelmiä, joiden avulla mutaatiotestauksen laskentakustannuksia pienennetään. Mutaatiotestauksessa laskentaa voidaan tehostaa tekemällä mutaatiotestausta *viisaammin* (*do smarter*), *nopeammin* (*do faster*) ja *pienemmällä mutanttimäärällä* (*do fewer*) kuin ennen/aiemmin.

Do smarter laskentatyön jakaminen usealle laitteelle tai weak mutation.

Do faster mutanttien generoinnin/kääntämisen ja suorituksen tehostaminen, jotta voitaisiin suorittaa niin nopeasti kuin mahdollista. MSG metodi (MuJava) tai compiler-integrated program mutation tai separate compilation.

Do fewer vähemmän mutantteja ilman "mutaatiokattavuuden"kärsimistä suuresti. Mutant sampling, selective mutation,

5.3 Manuaalinen työ

Kolmas mutaatiotestauksen ongelma-alue liittyy perinteiseen mutaatiotestausprosessiin sisältyvään manuaaliseen työhön. Perinteisessä mutaatiotestausprosessissa useaan prosessin työvaiheeseen sisältyy manuaalista työtä. Kuvassa 1 **(sivulla 8)** on esitelty perinteinen mutaatiotestausprosessi. **Kuvassa olevaan kaavioon/kuvan kaavioon** on merkitty työvaihe, jossa alkuperäisten testien suorituksen jälkeen tarkastetaan, ovatko testit menneet läpi.

Manuaalinen testien läpimenotarkastus on usein testausprosessin työläin osa [JH11, s. 653]. Manuaaliessa läpimenotarkastuksessa **ihminen** toimii testioraakkelina. **Tämä ongelma/Ihmisoraakkeliongelma (human oracle problem)** ei liity pelkästään mutaatiotestaukseen vaan ongelma ilmenee myös muissa testausmenetelmissä. Koska mutaatiotestauksessa suoritetaan usein paljon testejä, testauksen tulosten tarkastamiseen vaadittava työmäärä kasvaa [JH11, s. 653]. **Tarvitaanko tuon väitteen perään uudestaan tuo lähde?**

Uusien, mutantteja tappavien testien kehittäminen on myös yksi perinteisen mutaatiotestausprosessin työläistä manuaalisista työvaiheista [OU01, s. 39]. Mutaatiotestauksessa tavoitteena on kehittää testejä, jotka tappavat mahdollisimman paljon mutantteja **(mutation adequate)**. Manuaalisesti tällaisten testien kehittäminen on työlästä. Lisäksi sopivien syötteiden löytäminen testejä varten on yksi vaikeimmista testauksen vaiheista [OU01, s. 39]. Testien automaattista generointia varten on kuitenkin kehitetty menetelmiä, joiden avulla testien generointi voidaan mutaatiotestausprosessissa automatisoida osittain.

6 Yhteenveto

Olioperustaisen ohjelmoinnin mukana tulevien uusien haasteiden kohtaaminen vaatii muutoksia myös ohjelmistojen testausmenetelmiin. Sekä perinteisiä olemassa olevia että uusia testausmenetelmiä kehitetään, jotta olio-ohjelmia voidaan testata kattavasti ja laadukkaasti.

Perinteisessä ohjelmistotestauksessa keskitytään ohjelmiston toiminnallisuuden testaamiseen ja vikojen etsimiseen ohjelmistosta. Perinteiseen ohjelmistotestaukseen liittyy kuitenkin haasteita, jotka aiheuttavat testaukseen epävarmuutta. Yksi haasteista on määrittää, ovatko testauksessa käytettävät testit ja testausjärjestelmä riittävän luotettavia, jotta niiden avulla ohjelmistoa voidaan testata laadukkaasti.

Mutaatiotestaus on virheperustainen testausmenetelmä, joka tarjoaa ratkaisun testien laadun määrittämiseen liittyvään haasteeseen. Mutaatiotestauksen avulla voidaan mitata ohjelmistoa varten tehtyjen testien kykyä havaita ohjelmistossa esiintyviä vikoja. Mutaatiotestausmenetelmän avul-

la on siis mahdollista kehittää olemassa olevia testejä ja parantaa testien luotettavuutta.

Mutaatiotestauksen käyttö yleisesti osana testausprosessia on vähäistä mutaatiotestaukseen liittyvien ratkaisemattomien ongelmien takia. Mutaatiotestausta on kuitenkin tutkittu paljon. Tutkimuksen avulla voi olla mahdollista löytää ratkaisuja mutaatiotestausta vaivaaviin ongelmiin, jotta mutaatiotestauksen laaja-alainen käyttö voisi tulevaisuudessa olla mahdollista.

Lähteet

Bin99 Binder, Robert V.: *Testing Object-oriented Systems: Models, Patterns, and Tools*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1999, ISBN 0-201-80938-9.

DDH72 Dahl, O. J., Dijkstra, E. W. ja Hoare, C. A. R. (toimittajat): *Structured Programming*. Academic Press Ltd., London, UK, UK, 1972, ISBN 0-12-200550-3.

DLS78 DeMillo, R. A., Lipton, R. J. ja Sayward, F. G.: *Hints on Test Data Selection: Help for the Practicing Programmer*. Computer, 11(4):34–41, huhtikuu 1978, ISSN 0018-9162. `http://dx.doi.org/10.1109/C-M.1978.218136`.

IEE10 *IEEE Standard Classification for Software Anomalies*. IEEE Std 1044-2009 (Revision of IEEE Std 1044-1993), sivut 1–23, Jan 2010.

JH11 Jia, Yue ja Harman, Mark: *An Analysis and Survey of the Development of Mutation Testing*. IEEE Trans. Softw. Eng., 37(5):649–678, syyskuu 2011, ISSN 0098-5589. `http://dx.doi.org/10.1109/TSE.2010.62`.

KCM00 Kim, Sunwoo, Clark, John A. ja McDermid, John A.: *Class Mutation: Mutation Testing for Object-oriented Programs*. Teoksessa *Proceedings of the Net.ObjectDays Conference on Object-Oriented Software Systems*, lokakuu 2000.

MHK06 Ma, Yu Seung, Harrold, Mary Jean ja Kwon, Yong Rae: *Evaluation of Mutation Testing for Object-oriented Programs*. Teoksessa *Proceedings of the 28th International Conference on Software Engineering*, ICSE '06, sivut 869–872, New York, NY, USA, 2006. ACM, ISBN 1-59593-375-1. `http://doi.acm.org/10.1145/1134285.1134437`.

MKO02 Ma, Yu Seung, Kwon, Yong Rae ja Offutt, J.: *Inter-class mutation operators for Java*. Teoksessa *Software Reliability Engineering, 2002.*

ISSRE 2003. Proceedings. 13th International Symposium on, sivut 352–363, 2002.

MP08 Mariani, Leonardo ja Pezze, Mauro: *Testing Object-Oriented Software*, luku Emerging Methods, Technologies and Process Management in Software Engineering, sivut 85–108. Wiley-IEEE Computer Society Press, 2008.

MW78 Manna, Zohar ja Waldinger, Richard J.: *The Logic of Computer Programming*. IEEE Trans. Software Eng., 4(3):199–229, 1978. `http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TSE.1978.231499`.

Off11 Offutt, Jeff: *A mutation carol: Past, present and future*. Information & Software Technology, 53(10):1098–1107, 2011. `http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2011.03.007`.

OMK06 Offutt, Jeff, Ma, Yu Seung ja Kwon, Yong Rae: *The Class-level Mutants of MuJava*. Teoksessa *Proceedings of the 2006 International Workshop on Automation of Software Test*, AST '06, sivut 78–84, New York, NY, USA, 2006. ACM, ISBN 1-59593-408-1. `http://doi.acm.org/10.1145/1138929.1138945`.

OU01 Offutt, A. Jefferson ja Untch, Ronald H.: *Mutation Testing for the New Century*. luku Mutation 2000: Uniting the Orthogonal, sivut 34–44. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 2001, ISBN 0-7923-7323-5. `http://dl.acm.org/citation.cfm?id=571305.571314`.