

hyväksymispäivä

arvosana

arvostelija

Mutaatiotestaus oliojärjestelmissä

Eveliina Pakarinen

Aine

HELSINGIN YLIOPISTO

Tietojenkäsittelytieteen laitos

Helsinki, 27. lokakuuta 2015

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	
Aine	27. lokakuuta 2015	16	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>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 ei ole uusi menetelmä vaan se esiteltiin ensimmäistä kertaa jo 1970-luvulla.</p> <p>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.</p> <p>ACM Computing Classification System (CCS):</p> <p>D.2.4 [Software/Program Verification]</p> <p>D.2.5 [Testing and Debugging]</p> <p>D.3.3 [Language Constructs and Features]</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
mutaatiotestaus, oliojärjestelmät, Java			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Additional information			

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Testaus oliojärjestelmissä	2
2.1	Testauksen rooli oliojärjestelmissä	2
2.2	Testauksen tasot	2
2.3	Testien suunnittelu	3
2.4	Testauksen rajoitukset	4
3	Mutaatiotestaus	5
3.1	Mutaatiotestauksen historia ja periaatteet/teoreettinen perusta	5
3.2	Perinteinen mutaatiotestausprosessi	6
4	Mutaatiotestaus oliojärjestelmissä	9
4.1	Mutaatio-operaattorit oliojärjestelmissä	9
4.2	Mutaatiosovellukset oliojärjestelmille	11
5	Mutaatiotestauksen haasteet	12
5.1	Ekvivalentit mutantit	12
5.2	Tehokkuusongelmat	12
5.3	Ihmisten työpanosongelma	13
6	Yhteenveto	13
	Lähteet	15

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 virheiden 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 laadukkuuden 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 esiintyvät virheet ja ongelmat [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-ohjelmissa testien laadun varmistamiseen [KCM00].

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

ihmisiltä 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 Testauksen rooli oliojärjestelmissä

Testausta käytetään ohjelmistokehityksessä ohjelmiston laadun varmistamiseen ja auttamaan virheiden havaitsemisessa jo kehitysvaiheen aikana. Ohjelmistojen testaamisen ensisijainen tavoite on siis paljastaa virheitä, joiden havaitseminen muiden laadunvarmistusmenetelmien avulla olisi työlästä tai mahdotonta [Bin99, s. 59]. Testauksen avulla pyritään lisäksi 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]. **Lisää tähän? Binderin kirjasta löytyy tietoa.**

2.2 Testauksen tasot

Ohjelmistoja voidaan testata usealla tasolla. Tasoja ovat yksikkö-, integraatio- ja järjestelmätasot ja ne 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. **Lisää tietoa yksikkötestauksesta.**

Yksikkötestauksesta seuraava taso ylöspäin on *integraatiotestaus* (*integration testing*), jossa tarkastellaan järjestelmän tai sen osien yhteistointia [Bin99, s. 45]. Integraatiotestauksessa testataan siis järjestelmän osien välisiä rajapintoja ja osien keskinäistä kommunikointia. Olio-ohjelmissa luokkien muodostuminen perinnän avulla ja luokkien koostuminen toisten luokkien olioista aiheuttaa, että integraatiotestaukselle on olio-ohjelmoinnissa tarvetta jo ohjelmoinnin alkuvaiheessa. **Lisää ehkä vähän myös tästä.**

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, suorituskkyky tai sovelluksen kestävä kuormitus [Bin99, s. 45]. **Tästä jonkin verran lisää.**

Joku kokoelmakuva testauksen tasoista + testausmenetelmistä?

2.3 Testien suunnittelu

Testien suunnitteluun ja kehittämiseen voidaan käyttää useita menetelmiä. Testausmenetelmän avulla kuvataan näkökulmaa, josta esimerkiksi ohjelman lähdekoodia tarkastellaan testejä kehitettäessä [Bin99, s. 51]. Uusia testejä kehitettäessä testausmenetelmiä ovat esimerkiksi white box - ja black box -testaus sekä niitä yhdistävä hybriditestaus. Virheisiin perustuvan testausmenetelmän avulla voidaan kehittää olemassa olevia testejä.

Ohjelman sisäisen rakenteen eli lähdekoodin tuntemukseen perustuvaa testausmenetelmää kutsutaan *white box -testaukseksi* [Bin99, s. 52]. **Lisää tästä.** 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 tun-

temuksen avulla [Bin99, s. 52]. **Lisää tuosta.** 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 - että black box -testausmenetelmää voidaan käyttää testien suunnittelussa useilla testauksen tasoilla joko erikseen tai molempien piirteitä yhdistäen.

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

2.4 Testauksen 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 testaamista. Kattava testaaminen on kuitenkin käytännössä usein mahdotonta toteuttaa muille kuin triviaaleille ohjelmille [Bin99, s. 58]. Oikeellisuuden todistamiseen liittyen Edsger Dijkstra totesi: *"Program testing can be used to show the presence of bugs, but never to show their absence!"* [DDH72, s. 6].

Suoritettujen testien tulosten tulkintaan liittyy myös rajoituksia ja epävarmuutta. Epävarmuus ilmenee, kun testien suorituksen tuloksia varten ei ole olemassa vertailukohdaksi luotettavia odotettuja tuloksia. Tällöin testauksesta saatujen toteutuneiden tulosten tulkinta ja arviointi on epävarmaa. Toteutuneista tuloksista ei voi siis luotettavasti päätellä, menivätkö testit

läpi vai eivät [Bin99, s. 58].

Epävarmuutta liittyy myös testattavan järjestelmän halutulle toiminnallisuudelle asetettuihin vaatimuksiin. Toiminnallisuusvaatimusten todentaminen testauksen avulla ei ole mahdollista, joten vaatimuksia on käytettävä vain vertailukohtana testauksen tulosten tulkinnassa [Bin99, s. 58]. Jos virheellisiä tai puutteellisia vaatimuksia käytetään testejä tehdessä, voi siitä seurata harhaanjohtavia testejä. Testauksen avulla ei myöskään voi paljastaa lähdekoodista puuttuvia osia, sillä olematonta koodia ei voi testata [Bin99, s. 58].

Rajoituksista selvennettävä noita 2 viimeistä kappaletta. Niissä voi olla jotakin epäselvyyksiä. Ainakin mulla vielä on joten vois selventää niitä hivin vuoksi.

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 mahdollisuus testien kehittämiseen ja niiden laadun parantamiseen on *mutaatiotestaus*. Mutaatiotestauksen avulla voidaan mitata, kuinka tehokkaasti ohjelmiston testeillä havaitaan ohjelmistossa esiintyviä virheitä [JH11, s. 649].

3.1 Mutaatiotestauksen historia ja periaatteet/teoreettinen perusta

Mutaatiotestauksesta kirjoitettiin ensimmäistä kertaa jo 1970-luvulla. De-Millon, Liptonin ja Saywardin artikkeli [DLS78] vuodelta 1978 on yksi ensimmäisistä urauurtavista 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 ja lisäksi käsittele ne hypoteesit mutaatiotestauksen takana eli competent programmer hypothesis ja coupling effect

Lisää juttua siitä, että mutaatiotestaus kasvattaa testitkattavuutta.

3.2 Perinteinen mutaatiotestausprosessi

Tavoitteena on havaita testien avulla lähdekoodiin tehdyt muutokset [OU01, s. 35]. **Tähän joku hyvä aloituskappale.**

Perinteisessä mutaatiotestausprosessissa ensimmäinen vaihe on käsitellä ohjelmiston alkuperäistä lähdekoodia *mutatio-operaattoreilla*, jotka muuntavat koodia muodostaen siitä virheellisiä versioita [MHK06, s. 869]. Näitä virheellisiä 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 ohjelmassa havaitaan virheitä, virheet korjataan ennen kuin mutaatiotestausta jatketaan.

Seuraavaksi testit suoritetaan jokaisen elävän mutantin kohdalla [OU01, s. 35]. Mutaatiotestausprosessin työvaiheet (**havainnollistetaan?**)/esitellään kuvassa 1. Työvaiheet on merkitty kuvaan sinisillä laatikoilla. Työvaiheiden aikana käytettäviä resursseja kuvataan vihreillä ja keltaisilla laatikoilla.

Testien suorituksen jälkeen suorituksesta saatuja 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].

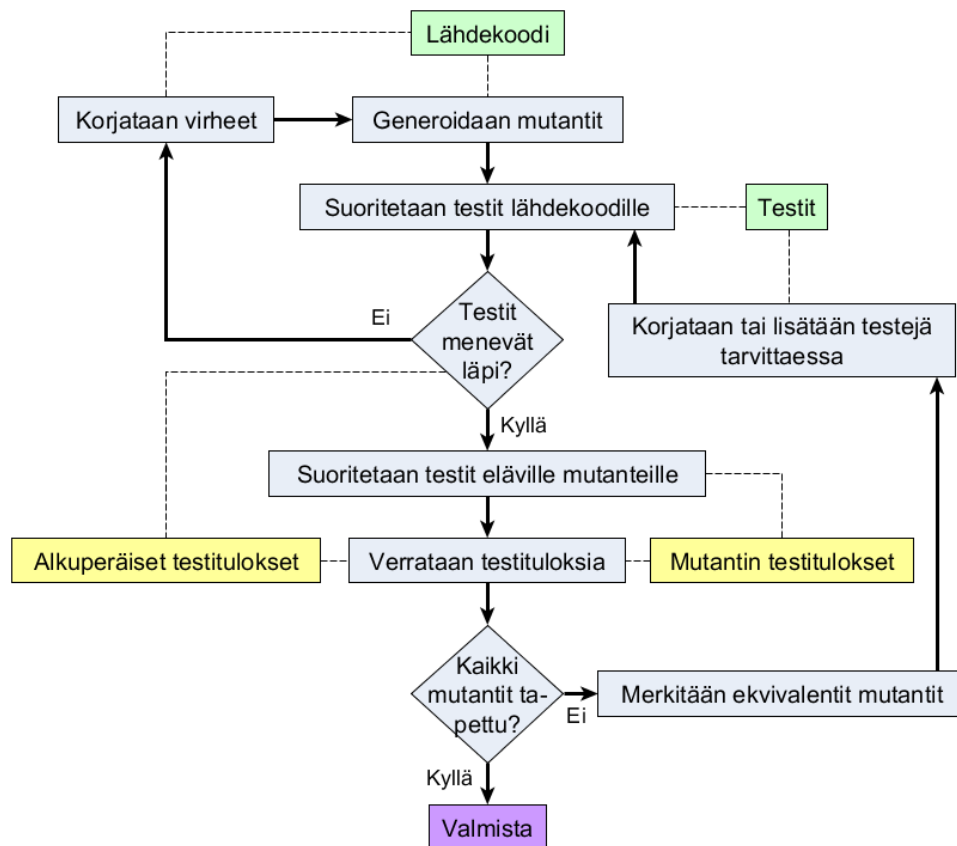
Tapauksessa 2. alkuperäiset testit ovat menneet läpi mutantin kohdalla eli mutantti on jäänyt eloon. Mutantin jäämiselle eloon on kaksi vaihtoehtoista selitystä [DLS78, s. 36]. Ensimmäinen selitys on, että alkuperäiset testit eivät ole riittävän hyvät, jotta niiden avulla voidaan havaita lähdekoodiin 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 (yhteen/erikseen?)** mutantit saadaan tapettua.

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

$$MP = \frac{T}{K - E}, \quad (1)$$

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]. Testit ovat tällöin *adequate relative to the mutants* riittävät havaitsemaan kaikki mutantit. Perinteinen mutaatiotestausprosessi päättyy, kun kaikki *ei-ekvivalentit* (miten tämä kirjoitetaan?) mutantit on tapettu. Tämä on merkitty kuvaan 1 violetilla laatikolla.



Kuva 1: Perinteinen mutaatiotestausprosessi.

Omaa muotoilua perustuen Uniting orthogonal 2000 artikkeliin

→ **uusi mutaatiotestausprosessi:** Kuvasta 1 huomataan, että mutaatiotestausprosessi sisältää silmukoita. Ensimmäinen silmukka sisältää mutanttien generoinnin, testien suorituksen alkuperäiselle lähdekoodille ja testien tulosten tarkastamisen jälkeen virheiden korjauksen. Näistä työvaiheista alkuperäisten testitulosten tarkastaminen ja alkuperäisen ohjelman virheiden korjaaminen vaativat manuaalista työtä.

Toinen silmukka eli mutaatiotestauksen pääsilmukka muodostuu työvaiheista, jotka suoritetaan alkuperäisten testitulosten läpimenotarkastuksen jälkeen. Toiseen silmukkaan sisältyvät myös ensimmäisen silmukan työvaiheista testien suoritus lähdekoodille ja testien läpimenotarkastus. Tämä tarkoittaa, että silmukat risteävät näiden työvaiheiden kohdalla. Toisessa

silmukassa manuaalista työtä vaativat ekvivalenttien mutanttien etsiminen ja merkitseminen ja uusien testien lisääminen tai olemassa olevien testien kehittäminen.

Onko konditionaali sallittu → en tiedä, onko tämä jo käytössä? Jotta mutaatiotestausprosessia voidaan tehostaa, manuaaliset työvaiheet tulisi poistaa mutaatiotestauksen pääsil mukasta [OU01, s. 41]. Perinteisen mutaatiotestausprosessin tilalle tulisi uusi testausprosessi, jossa osa työläistä manuaalisista työvaiheista suoritettaisiin automaattisesti. Ekvivalenttien mutanttien tunnistaminen ja testien generointi ja kehittäminen voitaisiin uudessa testausprosessissa automatisoida, mikä tehostaisi mutaatiotestausprosessia. Ainoa merkittävä manuaalinen työvaihe uudessa mutaatiotestausprosessissa olisi tarkistaa, ovatko alkuperäiselle lähdekoodille suoritettut testit menneet läpi.

4 Mutaatiotestaus oliojärjestelmissä

Esittelyteksti kappaleelle tähän.

4.1 Mutaatio-operaattorit oliojärjestelmissä

Mutaatio-operaattorit ovat tärkeässä asemassa mutaatiotestauksessa, sillä mutaatiotestauksen tehokkuus riippuu siitä, minkälaisia virheitä mutaatio-operaattoreilla luodaan lähdekoodiin [MKO02, s. 352]. Perinteisesti mutaatiotestausta 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 verrattuna proseduraalisessa ohjelmoinnissa esiintyviin virheisiin. Uusien virheiden ilmeneminen olio-ohjelmissa on johtanut uusien olioperustaisten mutaatio-operaattorien kehittämiseen.

Olio-perustaisten ohjelmien mutaatiotestaukseen käytettävää menetelmää kutsutaan *luokkamutaatioksi* [KCM00]. Luokkamutaatiomenetelmän kehittivät Kim, Clark ja McDermid Java-ohjelmointikielessä esiintyvien virheiden 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. Ma, Kwon ja 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. Taulukon 1 avulla näkee myös, mihin ryhmiin luokkamutaatio-operaattorit kuuluvat. Tarkemmat tiedot operaattorien toiminnasta löytyvät artikkelista [MKO02].

Ryhmä	Operaattori	Kuvaus
Pääsynvalvonta	ACM	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	<i>super</i> keyword deletion
	IPC	Explicit call of a parent's constructor deletion
Polymorfismi	PNC	<i>new</i> 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 ylikuormitus	OMR	Overloading method contents change
	OMD	Overloading method deletion
	OAO	Argument order change
	OAN	Argument number change
Javan erityispiirteet	JTD	<i>this</i> keyword deletion
	JSC	<i>static</i> 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.

4.2 Mutaatiosovellukset oliojärjestelmille

MuJava? jotakin muita. Onko yleisessä käytössä olevia (commercial) järjestelmiä?

5 Mutaatiotestauksen haasteet

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

5.1 Ekvivalentit mutantit

Ratkaisematon ongelma. Esimerkki ekvivalenteista mutanteista. Miten on yritetty ratkaista? → erilaisilla tunnistusalgoritmeilla, tulevaisuudessa välttää ekvivalenttien mutanttien syntymistä.

Toinen mutaatiotestaukseen liittyvistä ongelma-alueista on ekvivalentit mutantit. Ekvivalenttien mutanttien tunnistaminen algoritmien avulla on ratkaisematon ongelma [JH11, s. 657]. Koska ekvivalentteja mutantteja ei voi tunnistaa laskennan avulla, ihmisten on suoritettava ekvivalenttien mutanttien tunnistaminen tutkimalla mutanttia ja vertaamalla sen toimintaa alkuperäisen ohjelmiston toimintaan. Tämä menetelmä johtaa mutaatiotestauksen toteuttamiseen tarvittavan työmäärän kasvuun. Ekvivalenttien mutanttien tunnistamisongelma on kuitenkin herättänyt runsaasti teoreettista kiinnostusta, ja mahdollisia tunnistamistekniikoita tutkittu paljon [JH11, s. 657].

5.2 Tehokkuusongelmat

Laitteisto, testien määrä→suoritus tehotonta. Miten on yritetty ratkaista → weak mutation, suorituksen jakaminen usealle prosessorille, mutanttien määrän vähentäminen

Yksi mutaatiotestauksen ongelma-alueista on tehokkuuteen liittyvät ongelmat. 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]. Ratkaisuehdo-

tuksia ovat esimerkiksi generoitujen mutanttien määrän vähentäminen ja mutanttien ja testien suorituskustannusten pienentäminen.

5.3 Ihmisten työpanosongelma

Tähän liittyy ekvivalentit mutantit → niiden tunnistaminen ja human oracle ongelma → eli ihmisen käytävä testitulokset läpi sen jälkeen kun tulokset on saatu.

Kolmas ongelma-alue liittyy mutaatiotestauksen vaiheeseen, jossa ihmisten on tarkastettava testauksesta saadut tulokset [JH11, s. 652]. Tarkastusvaiheessa testien suorituksen jälkeen tarkastetaan suorituksesta saatu tuloste. Tulosteen tarkastusvaihe on usein testausprosessin työläin osa [JH11, s. 653]. Tämä ongelma ei liity pelkästään mutaatiotestaukseen vaan ongelma ilmenee myös muissa testausmenetelmissä. Mutaatiotestauksessa ekvivalenttien mutanttien tunnistaminen ja suoritettujen testien suuri määrä lisäävät kuitenkin työmäärää, joka tarvitaan testauksen tulosten tarkastamiseen.

6 Yhteenveto

Olioperustaisen ohjelmoinnin mukana tulevien uusien haasteiden kohtaaminen tuo 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 virheiden 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 virheitä. Mutaatiotestausmenetelmän avulla 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>.
- 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>.

- 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>.