

VILNIAUS UNIVERSITETAS

LAURA SAVIČIENĖ

NORMINIŲ TAISYKLIŲ PAŽEIDIMO MODELIAVIMO IR VIZUALIZAVIMO
TYRIMAS SPRENDIMŲ PARAMAI LĖKTUVO KILIMO IR TŪPIMO FAZĖSE

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, informatika (09P)

Vilnius, 2012

Disertacija rengta 2008 – 2012 metais Vilniaus universitete.

Mokslinis vadovas:

doc. dr. Vytautas Čyras (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, informatika – 09P)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Informatikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas – prof. habil. dr. Feliksas Ivanauskas (Vilniaus universiteto Matematikos ir informatikos fakultetas, fiziniai mokslai, informatika – 09P).

Nariai:

prof. dr. Albertas Čaplinskas (Vilniaus universiteto Matematikos ir informatikos institutas, fiziniai mokslai, informatika – 09P);

prof. habil. dr. Rimvydas Simutis (Kauno technologijos universitetas, fiziniai mokslai, informatika – 09P);

prof. habil. dr. Jonas Stankūnas (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, transporto inžinerija – 03T);

prof. habil. dr. Antanas Žilinskas (Vilniaus universiteto Matematikos ir informatikos institutas, fiziniai mokslai, informatika – 09P).

Oponentai:

prof. dr. Dalė Dzemydienė (Mykolo Romerio universitetas, fiziniai mokslai, informatika – 09P);

prof. dr. Olegas Vasilecas (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T).

Disertacija bus ginama viešame Informatikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2012 m. gruodžio mėn. 20 d. 14 val. Vilniaus universiteto Skaitmeninių tyrimų ir skaičiavimo centre Vaizdo konferencijų studijoje.

Adresas: Šaltinių g. 1A, LT-03225, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2012 m. lapkričio mėn. ____ d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bibliotekoje.

VILNIUS UNIVERSITY

LAURA SAVIČIENĖ

MODELING AND VISUALIZATION OF NORM VIOLATION IN DECISION
SUPPORT FOR AIRCRAFT APPROACH/DEPARTURE

Summary of doctoral dissertation
Physical sciences, informatics (09P)

Vilnius, 2012

The work was performed during the period 2008 – 2012 at Vilnius University, Vilnius, Lithuania.

Scientific supervisor:

doc. dr. Vytautas Čyras (Vilnius University, physical sciences, informatics – 09P)

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Informatics at Vilnius University:

Chairman – prof. habil. dr. Feliksas Ivanauskas (Vilnius University, physical sciences, informatics – 09P)

Members:

prof. dr. Albertas Čaplinskas (Vilnius University Institute of Mathematics and Informatics, physical sciences, informatics – 09P);

prof. habil. dr. Rimvydas Simutis (Kaunas University of Technology, physical sciences, informatics – 09P);

prof. habil. dr. Jonas Stankūnas (Vilnius Gediminas Technical University, technological sciences, transport engineering – 03T);

prof. habil. dr. Antanas Žilinskas (Vilnius University Institute of Mathematics and Informatics, physical sciences, informatics – 09P).

Opponents:

prof. dr. Dalė Dzemydienė (Mykolas Romeris University, physical sciences, informatics – 09P);

prof. dr. Olegas Vasilecas (Vilnius Gediminas Technical University, technological sciences, informatics engineering – 07T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council in the VU MIF Digital Science and Computing Center video conference studio on the 20th of December, 2012 at 14:00.

Address: Šaltinių 1A, LT-03225 Vilnius, Lithuania.

The summary of the dissertation was distributed on the ___th of November, 2012.

The dissertation is available at the library of Vilnius University.

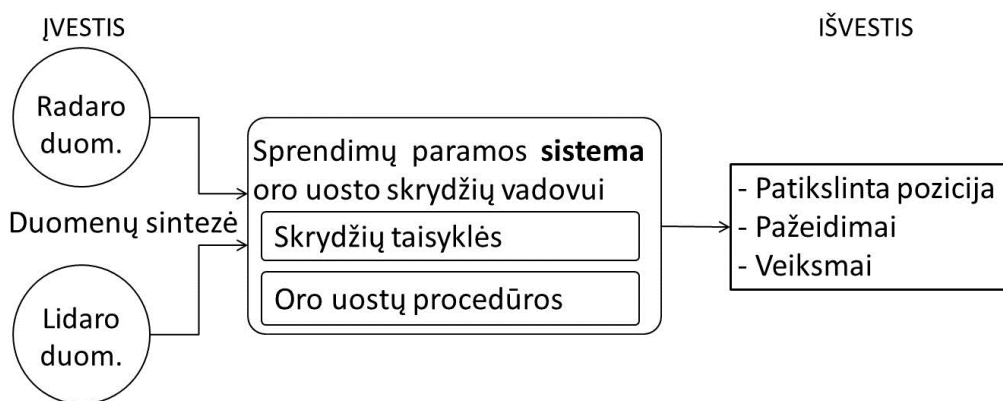
Įvadas

Tyrimo kontekstas

Šio darbo tyrimo objektas yra norminių taisyklių pažeidimo modeliavimas aviacijos dalykinėje srityje. Norminės taisyklės lėktuvų trajektorijoms paimamos iš skrydžio taisyklių (angl. *flight rules*), žemėlapių, schemų, oro uostų procedūrų ir kt. Šiame tyrime nediferencijuojami skirtingi norminių taisyklių modalumai (pvz., „draudžia“, „leidžia“, „rekomenduoja“, „įpareigoja“). Sąvokos „norminės taisyklės“ ir „normos“ šiame tekste naudojamos kaip sinonimai. Normos pavyzdys: leistas 3 laipsnių kampas su apribojimais (aukščio, geografiniais ir kt.), nurodytais schemeje.

Tyrimė remiamasi prielaida, kad naujoviškas stebėjimo įrenginys (lidaras) leidžia gauti tikslią lėktuvo poziciją 6 jūrmylių (angl. *nautical miles*, NM) spinduliu aplink oro uostą (jo eismo zonos centrą). Šioje zonoje lėktuvai yra kilimo arba tūpimo fazėse. Kilimas ir tūpimas čia suprantamas plačiąja prasme – kaip visos skrydžio fazės nuo lėktuvo atsiplėšimo nuo žemės iki pakilimo į maršruto aukštį bei nuo maršruto pabaigos iki nusileidimo ant žemės. Tyrimas apsiriboja normomis, taikomomis būtent šiose skrydžio fazėse. Nagrinėjamos oro uostų schemas ir norminės taisyklės, kurios reglamentuoja saugų atstumą tarp lėktuvų ir valkties turbulencijos bei pelenų debesų vengimą.

Norminės taisyklės modeliuojamos sprendimų paramos sistemoje (SPS). Sprendimų parama grindžiama galimo norminės taisyklės pažeidimo vertinimu. Sistema skirta oro uosto skrydžių vadovui (dispečeriui) ir turi veikti realiu laiku. SPS (1 pav.) stebi, vertina ir rekomenduoja, o galutinį sprendimą, kokius nurodymus duoti pilotui, priima žmogus – skrydžių vadovas.



1 pav. Nagrinėjama sprendimų paramos samprata

Tyrimo problema

Aukšto lygio problema: norminių taisyklių pažeidimo modeliavimas ir vizualizavimas. Žemesnio lygio problema: lėktuvo kilimo/tūpimo normų pažeidimo

modeliavimas ir vizualizavimas (grafinis informacijos pateikimas). Problema nagrinėjama naujame kontekste – lidaro („lazerinio radaro“, angl. *Light Detection And Ranging*) teikiamų naujų galimybių kontekste. Darbe kuriama teorija (metodas). Teorijos demonstravimui sukurtas SPS prototipas. Komercinės sprendimų paramos sistemos kūrimas išeina už šio tyrimo ribų.

Motyvacija

Darbas išaugo iš tyrimų, atliktų ES 6BP projekte „Inovatyvi lazerinio atpažinimo ir matomumo (LIDAR) technologija naujos kartos oro transporto valdymo paradigmos“ (SKY-Scanner¹). Projekte buvo tiriama kaip lėktuvo stebėjimui kartu su radaru panaudoti ir lidarą. Atskiras uždavinys yra radaro ir lidaro duomenų sintezė (angl. *data fusion*). „SKY-Scanner“ sistema skirta lėktuvams aptikti ir stebėti 6 jūrmylių spinduliu aplink oro uosto eismo zonos centrą (Salerno et al., 2008). Buvo sukurtas prototipas, sudarytas iš besisukančio lazerio ir valdymo kompiuterio. Skrydžių vadovo SPS yra „SKY-Scanner“ programinės įrangos posistemis.

Dalyvavimas projekte patvirtino problemą ir šio tyrimo rezultatus. Rezultatai, kurie pristatyti projekto teikiniuose (Čyras, Dapkūnas, Lapin, Plankis & Savičienė, 2009) bei (Čyras, Lapin & Savičienė, 2011) atsispindi ir publikacijose, ir disertacijos tekste.

„SKY-Scanner“ kontekstas pateikia šias pagrindines prielaidas tyrimui:

1. Lidaras, naudojamas kartu su radaru, pateikia lėktuvo poziciją dideliu tikslumu (paklaidos vertinamos metrais). Tai leidžia SPS aptikti realios trajektorijos nukrypimus nuo norminės (t. y. fiksuoti norminės trajektorijos pažeidimus).
2. SPS tiesiog informuoja skrydžių vadovą. Tuomet sprendimas dėl atliktinų veiksmų priklauso tik nuo jo. Skrydžių vadovas gali duoti nurodymus pilotui, kuris atsakingas už lėktuvo valdymą.

Tikslas ir uždaviniai

Šio darbo tikslas yra ištirti norminių taisyklių modeliavimą ir jų pažeidimo vizualizavimą sprendimų paramoje lėktuvo kilimo/tūpimo fazėse. Vadovaujamosi prielaida, kad yra stebima lėktuvo padėtis – apjungiant radiolokacijos duomenis.

Uždaviniai:

1. Atlikti skrydžio taisyklių ir procedūrų, taikomų lėktuvo kilimo ir tūpimo metu, analizę. Parinkti normines taisykles, kurias įmanoma sumodeliuoti skrydžių vadovo sprendimų paramos sistemoje.
2. Atlikti analizę teorinių, matematinių ir kompiuterinių modeliavimo metodų susijusiose dalykinėse srityse – sprendimų paramoje aviacijai, rizikos modeliavime ir skrydžių valdymo vizualizavime.
3. Apibrėžti taisyklių/procedūrų pažeidimo sampratą. Sukurti pažeidimo modelį lėktuvo kilimui/tūpimui.

¹ Tyrimų sritis „Aeronautika ir erdvė“ (TP1.4 Aeronautics and space), TREN-4-Aero, 037161, 2007 – 2010.

4. Sukurti pažeidimo vizualizavimo modelį. Apibrėžti pažeidimo tikėtino vizualizavimą ir trajektorijos pažeidimo vizualizavimą.
5. Sukurti sprendimų paramos sistemos prototipą. Sumodeliuoti radaro ir lidaro duomenų sintezę, trajektorijos numatymą ir korekcinių veiksmų parinkimą.
6. Pademonstruoti sukurtą metodą sumodeliuojant ir vizualizuojant konkrečių norminių taisyklių pažeidimą: artėjimo tūpti procedūras, valkties turbulencijos ir pelenų debesų vengimą.

Tyrimo metodai

1. Norminių dokumentų analizė: oro eismo ir skrydžių valdymo reglamentavimas bei oro uostų schemas su kilimo bei tūpimo procedūromis.
2. Mokslinės literatūros analizė.
3. Simbolizavimas ir formalizavimas – kuriamas norminės taisyklės pažeidimo modelis.
4. Tyrimas konstravimu – kuriamas sprendimų paramos sistemos prototipas.

Rezultatai

1. Pasiūlytas metodas modeliuoti normines taisykles lėktuvo kilimo/tūpimo fazėse bei vizualizuoti jų pažeidimą.
 - 1.1. Kiekviena norminė taisyklė modeliuojama kaip trejetas: faktorius, norminė reikšmė ir predikatas. Identifikuoti du normų tipai: susijusios su apribojimais ir susijusios su nukrypimais.
 - 1.2. Apibrėžta taisyklių/procedūrų pažeidimo tikėtino samprata. Tikėtino įvertis suprantamas kaip reitingavimas, eksperto išreikštas skaičiumi tarp 0 ir 1.
 - 1.3. Pažeidimo apibrėžimas susieja modeliuojamą norminę taisyklę su slenksčių aibe ir diskrečiais lygmenimis. Pažeidimo vertinimas atvaizduoja stebimą faktoriaus reikšmę į diskretų tikėtino lygmenį.
2. Atlikta analizė ir atrinktos norminės taisyklės, kurias galima sumodeliuoti sprendimų paramos sistemoje. Iš norminių taisyklių paimtos tos normos, kurios susijusios su lėktuvo pozicija ir greičiu. Jos įvardintos kaip „geometrinės normos“.
3. Apibrėžtas pažeidimo vizualizavimo metodas. Į jį įeina norminės taisyklės pažeidimo vizualizavimas ir du vizualizavimo modeliai trajektorijos pažeidimui.
 - 3.1. Kiekvienas diskretus lygmuo siejamas su „šviesoforo“ spalva (žalia, geltona arba raudona). Papildoma – balta – spalva žymimas minimalus lygmuo, taip pat normos, kurios stebimu momentu neaktualios. Spalva rodoma pažeidimo indikatoriuje. Kiekvieną pažeidimo apibrėžimą atitinka atskiras indikatorius.
 - 3.2. Trajektorijos pažeidimo vizualizavimo modeliai rodo oro eismo situaciją 3D lange. Papildomai, jame rodomi 2D objektai: „integruotame 2D/3D“ modelyje – projekcijų sienos, o „gryname 3D“ modelyje – „žiedai“. Šie objektai padeda

- naudotojui vizualiai įvertinti, ar lėktuvo pozicija atitinka procedūroje reglamentuotą trajektoriją.
4. Sukurtas sprendimų paramos sistemos (SPS) prototipas. Pasirinktų norminių taisyklių pažeidimas sumodeliuotas prototipe demonstravimo tikslais.
 - 4.1. SPS prototipas pateikia siūlomo sprendimo realaus laiko imitavimą.
 - 4.2. Sumodeliuoti tokie faktoriai: horizontalus ir vertikalus intervalas tarp lėktuvų, aukštis nurodytu atstumu iki oro uosto, greitis oro atžvilgiu, glisada, atstumas iki pelenų debesies bei laiku grindžiamas valkties turbulencijos intervalas.
 5. Dalyvauta „SKY-Scanner“ projekte 2007 – 2010 m. Tokiu būdu, be kita ko, siūlomas metodas buvo validuotas (aprobuotas).

Mokslinis ir praktinis reikšmingumas

1. Darbe kuriama teorija, kuri nėra komplikauta taikymams praktikoje. Kompiuterinio modeliavimo požiūriu, šiame tyrime sukurtas paprastas norminės taisyklės pažeidimo vertinimo ir sprendimų priėmimo modelis. Jis pritaikytas tam tikrai dalykinei sričiai ir yra grindžiamas konkrečiu lėktuvo kilimo/tūpimo norminių taisyklių rinkiniu.
2. Norminės taisyklės lėktuvų kilimui/tūpimui anksčiau nebuvo nagrinėjamos modelio lygmenyje. Esamos su aviacija susijusios sprendimų paramos sistemos paprastai sutelkia dėmesį į atskirus uždavinius ir neišskiria normų iš kitų sistemos elementų. Šiuo metu nėra karkaso pavaizduoti normines taisykles sprendimų paramos sistemoje (jos vaizduojamos *ad-hoc* būdu), o šis tyrimas siekia priartėti prie tokio karkaso sukūrimo. Požiūris, pristatomas šiame darbe, išreikštinais pavaizduoja normų rinkinį ir jų pažeidimą sprendimų paramos sistemoje.
3. Šio darbo naujumas kyla ir iš konteksto naujumo – lidaro panaudojimo lėktuvų stebėjimui oro uosto eismo zonoje. Tikslūs lidaro duomenys apie lėktuvo poziciją suteikia galimybę patikrinti tokius apribojimų pažeidimus, kurių neįmanoma aptikti vien tik radaru.

Šis tyrimas aktualus tiek oro eismo valdymo (angl. *Air Traffic Management*, ATM) srityje vykdomiems moksliniams tyrimams, tiek dabartinėms skrydžių valdymo procedūroms oro uostuose. Tyrimas atitinka Vieningos Europos oro erdvės tyrimų (angl. *Single European Sky ATM Research*, SESAR) programos tikslus. SPS galėtų būti naudojama situacijos stebėjimui numatomuose SESAR oro eismo valdymo scenarijuose. Jei apribojimai SESAR keturių matmenų (4D) trajektorijoms būtų aprašyti kaip pažeidimų apibrėžimai, tai SPS galėtų stebėti šių apribojimų laikymąsi. Prielaida, kad sprendimų paramos sistema tik vertina ir rekomenduoja, o galutinį sprendimą priima žmogus, taip pat yra suderinama su SESAR vizija (SESAR, 2007, p. 18).

Interviu su skrydžių vadovais parodė, kad siūlomas pažeidimo modelis gali būti panaudotas skrydžių valdyje. Darbo eigoje SPS prototipas buvo demonstruotas trijų Lietuvos oro uostų skrydžių vadovams. Jie nurodė, kad, iš vienos pusės, dabartinės įrangos tikslumas yra pakankamas šiuo metu taikomoms procedūroms. Tačiau iš kitos

pusės buvo įvardintos tam tikros situacijos, kuriose lidarų grindžiama SPS galėtų būti naudinga²:

- Kai tūpimo pagal prietaisus sistemos (angl. *Instrument Landing System, ILS*) signalas susilpnėja dėl nelygios vietovės.
- Kai vykdoma artėjimo pagal antžeminę sistemą procedūra (pvz., kariniams lėktuvams, kurie neturi ILS).
- Stebinti orlaivius, neturinčius antrinio apžvalgos radaro (angl. *Secondary Surveillance Radar, SSR*) atsakiklio, pvz., sklandytuvus, arba atsakikliui sugedus.

Ginami teiginiai

1. Pasiūlytas metodas modeliuoti ir vizualizuoti norminės taisyklės pažeidimą sprendimų paramoje lėktuvų kilimui/tūpimui.
2. Siūlomas metodas tinka modeliuoti parinktas kilimo/tūpimo normines taisykles.
3. Sukurtas sprendimų paramos sistemos (SPS) prototipas demonstruoja, kad siūlomą metodą įmanoma realizuoti kompiuteriu.
4. Pasiūlyti du „trajektorijos pažeidimo“ vizualizavimo modeliai.
5. Normos pažeidimo modeliavimas gali būti automatizuotas šiems faktoriams: horizontalus ir vertikalus intervalas tarp lėktuvų, aukštis nurodytu atstumu iki oro uosto, greitis oro atžvilgiu, glisada ir valkties turbulencijos intervalas, kuris grindžiamas laiku. Jei norima sprendimų paramoje modeliuoti naują faktorių, reikalinga papildoma specifikos analizė, nes kiekvienas faktorius yra unikalus.

Aprobavimas

Pagrindiniai disertacijos rezultatai buvo pristatyti šiose konferencijose:

1. 10th International Baltic Conference on Databases and Information Systems „Baltic DB & IS 2012“, July 8–11, 2012, Vilnius.
2. 2-oji LMA jaunųjų mokslininkų konferencija „Tarpdalykiniai tyrimai fiziniuose ir technologijos moksluose“, 2012 m. vasario 14 d., Vilnius.
3. 15-oji tarptautinė kompiuterininkų konferencija, „Kompiuterininkų dienos 2011“, 2011 m. rugsėjo 22–24 d., Klaipėda.
4. 1st Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems, ATACCS 2011, May 26–27, 2011, Barcelona, Spain.
5. 16-oji tarptautinė konferencija „Informacinės technologijos 2010“ (IT 2010), 2010 m. balandžio 21–23 d., Kaunas.
6. 14-oji tarptautinė kompiuterininkų konferencija, „Kompiuterininkų dienos 2009“, 2009 m. rugsėjo 25–26 d., Kaunas.

² Interviu su skrydžių vadovais Vilniaus, Kauno ir Šiaulių oro uostuose 2011 m. gegužės – birželio mėn.

1. Dalykinės srities ir susijusių darbų analizė

1.1. Norminės taisyklės lėktuvo kilimo/tūpimo fazėse

Siekiant atrinkti normines taisykles, taikomas lėktuvų kilimui ir tūpimui, buvo nagrinėjami civilinės aviacijos norminiai dokumentai. Pagrindinius jų yra išleidusi Tarptautinė civilinės aviacijos organizacija (angl. *International Civil Aviation Organization*, ICAO). Skrydžių valdymo procedūros apibrėžiamos (ICAO Doc 4444, 2007). Šiose procedūrose nurodyti saugūs intervalai tarp lėktuvų – susidūrimų ir valkties turbulencijos vengimui. Oro uostų schemas nustato atvykimo ir išvykimo maršrutus bei instrumentinio artėjimo tūpti procedūras. Kiekvienas oro uostas turi savo unikalų schemų rinkinį. Schemas sudaromos remiantis (ICAO Annex 4, 2009) ir (ICAO Doc 8168, 2006) dokumentų reikalavimais. Rekomendacijos dėl vulkaninių pelenų, toksinių medžiagų atmosferoje ir kt. yra dokumente (ICAO Doc 9691, 2007). Nagrinėtos tik taisyklės, susijusios su pelenų debesimis. Papildomai buvo išnagrinėti Europos aviacijos agentūros „Eurocontrol“ 2010 metų vasaros nurodymai dėl pelenų debesų vengimo.

Normines taisykles lėktuvų kilimui ir tūpimui, apibrėžtas išvardintuose dokumentuose, galima sugrupuoti į šias kategorijas:

1. Saugaus intervalo taisyklės:
 - 1.1. Susidūrimų vengimo taisyklės (minimalus horizontalus ir vertikalus intervalas);
 - 1.2. Valkties turbulencijos vengimo taisyklės:
 - 1) Atskyrimas erdvėje (saugus intervalas grindžiamas atstumu tarp lėktuvų);
 - 2) Atskyrimas laike (saugus intervalas išreiškiamas laiko tarpais, kurie turi skirti lėktuvus);
2. Artėjimo tūpti ir išvykimo procedūros:
 - 2.1. Norminė trajektorija. Procedūroje nurodyti manevrai – skridimo kryptis, posūkiai ir kt. Nukrypimas nuo norminės trajektorijos sprendimų paramos sistemoje vadinamas „trajektorijos pažeidimu“;
 - 2.2. Apribojimai (skridimo aukščiui, greičiui ir kt.);
3. Su pelenų debesimis susiję apribojimai.

1.2. Sprendimų paramos sistemos aviacijoje

Norminės taisyklės pažeidimo modeliavimo uždavinys iš dalies yra susijęs su uždaviniais, kurie sprendžiami kitose aviacijos sprendimų paramos sistemose: konfliktinių situacijų aptikimo ir sprendimo (angl. *Conflict Detection and Resolution*, CD&R) sistemose, bei susidūrimų ore vengimo (angl. *collision avoidance*) sistemose.

1.2.1. Konfliktinių situacijų aptikimo ir sprendimo metodai

Kuchar ir Yang (2000) atliko išsamią CD&R sistemų apžvalgą ir pasiūlė klasifikaciją, apimančią šešis tokių sistemų projektavimo veiksnius. Konfliktinė situacija

apibrėžiama kaip „saugaus intervalo pažeidimas“, bet klasifikacija yra bendra ir gali būti naudojama ir su platesniu konfliktinės situacijos apibrėžimu. Pažeidimai, susiję su kitais pavojais, nebūtinai su kitais lėktuvais, gali būti apibendrinti tuo pačiu sprendimo priėmimo uždaviniu (Kuchar & Yang, 2000). Ši klasifikacija apima: informacijos apie lėktuvų pozicijas dimensijas, trajektorijos numatymo metodus, konfliktinės situacijos aptikimo slenksčius, konfliktinės situacijos sprendimo metodus, galimų manevrų dimensijas ir daugiau negu dviejų lėktuvų konfliktinės situacijos valdymą. CD&R sistemos labiausiai skiriasi trajektorijos numatymo (ekstrapoliavimo) metodu. Nominalus metodas prognozuoja vieną, labiausiai tikėtiną, trajektoriją, blogiausio atvejo metodas vadovaujasi prielaida, kad lėktuvas atliks blogiausią galimą manevrą, labiausiai priartinantį jį prie konfliktinės situacijos, o tikimybinis – išreikštinai modeliuoja manevrų tikimybes.

Kuchar ir Yang (2000) taip pat identifikuoja penkis esminius konfliktinių situacijų aptikimo ir sprendimo proceso komponentus (fazes): būsenos stebėjimą; dinaminį modelį (ekstrapoliavimą); matų, naudojamų konfliktinės situacijos aptikimui ir sprendimui dėl korekcinų veiksmų, apibrėžimus; konfliktinės situacijos aptikimą ir konfliktinės situacijos sprendimą.

Modeliuojant norminės taisyklės pažeidimą, jį taip pat galima apibrėžti kaip tam tikrą konfliktinę situaciją (priartėjimą prie pažeidimo). Taigi CD&R proceso struktūrą ir kūrimo principus galima panaudoti kuriant skrydžių vadovo sprendimų paramos sistemą.

1.2.2. Susidūrimų vengimo sistemos (ACAS)

Susidūrimų ore vengimo sistemos (angl. *Airborne Collision Avoidance System*, ACAS) skirtos ne saugiam intervalui tarp lėktuvų išlaikyti, o perspėti apie galimus susidūrimus (ICAO Doc 9863, 2006). Konfliktinės situacijos nustatymas Susidūrimų ore vengimo sistemoje susideda iš dviejų testų: atstumo testo ir aukščio testo (Lee, 2006). Atstumo testas tikrina per kiek laiko kitas lėktuvas priartės iki tam tikro atstumo, apibrėžiamo laiku. Aukščio testas tikrina, kiek kito lėktuvo aukštis artėja prie tam tikro aukščio kriterijaus (slenksčio). Jei šie testai patenkinami tuo pačiu metu, fiksuojamas galimas susidūrimas su kitu lėktuvu.

ACAS slenksčiai yra nepriklausomi nuo skrydžių valdymo saugaus intervalo taisyklių (ICAO Doc 9863, 2006). Skirtingai nuo pastarųjų, kurie yra grindžiami atstumu, pagrindiniai ACAS slenksčiai grindžiami laiku. ACAS samprata buvo sukurta remiantis tam tikrų prielaidų rinkiniu (Williams, 2004) ir slenksčiai parinkti būtent siekiant išvengti susidūrimų (ICAO Doc 9863, 2006).

JAV Naujos kartos oro transporto sistemos (angl. *Next Generation Air Transportation System*, NextGen) programoje siūlomas kitoks požiūris į galimų susidūrimų ore aptikimą ir sprendimą. NextGen algoritmas apibrėžia cilindro formos saugos zoną (angl. *protection zone*, PZ) aplink lėktuvą (Chamlou, 2009). Saugos zonos dydis yra konfigūruojamas. Pavyzdžiui, galima priskirti reikšmes, kurios atitinka galimo susidūrimo ore (angl. *near mid-air collision*) apibrėžimą. Čia susidūrimo tikėtumas

(norma) sistemoje vaizduojamas konkretaus dydžio saugos zona. Priklausomai nuo to, kaip saugos zona sukonfigūruota, ji gali modeliuoti įvairias normines taisykles – nuo saugaus intervalo išlaikymo iki susidūrimų vengimo (Chamlou, 2009).

Šiame darbe – panašiai kaip ir NextGen – siekiama apibrėžti metodą modeliuoti norminių taisyklių rinkinį. Tyrime nagrinėjama daugiau taisyklių, o ne vien tik susidūrimų vengimą reglamentuojančios taisyklės.

1.3. Rizikos modeliavimas

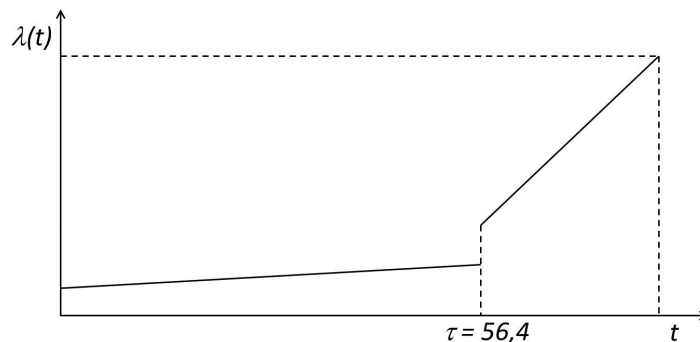
ISO 31000 standartas apibrėžia riziką kaip įvykio tikimybės ir pasekmių derinį (ISO Guide 73, 2009). Terminą „tikimybė“ (angl. *probability*) kai kuriuose kontekstuose galima pakeisti „švelnesniu“ terminu „tikėtinumą“ (angl. *likelihood*) (Mahler, 2009).

Rizikos valdymas susideda iš penkių pagrindinių procesų (Renn & Graham, 2005): apimties apibrėžimo, rizikos vertinimo, rizikos mažinimo, rizikos komunikavimo ir stebėjimo. Rizikos vertinimas (angl. *assessment*) apima rizikos identifikavimą, analizę ir reitingavimą (angl. *evaluation*). Abi rizikos dimensijos – tikėtinumą ir poveikis – gali būti įvertintos tiek kiekybiškai, tiek kokybiškai. Tuomet galima vertinti rizikos lygmenį, apjungiant rizikos tikėtinumą ir pasekmių vertinimus (Mahler, 2009), žr. 2 pav.

RIZIKOS MATRICA		POVEIKIS (PASEKMĖS)				
		Nereikšmingos	Mažos	Vidutinės	Didelės	Katastrofiškos
TIKĖTINUMAS	Labai tikėtina	Vidutinis	Aukštas	Aukštas	Labai aukštas	Labai aukštas
	Tikėtina	Vidutinis	Vidutinis	Aukštas	Aukštas	Labai aukštas
	Įmanoma	Žemas	Vidutinis	Vidutinis	Aukštas	Aukštas
	Nelabai tikėtina	Žemas	Žemas	Vidutinis	Vidutinis	Aukštas
	Mažai tikėtina	Žemas	Žemas	Žemas	Vidutinis	Aukštas

2 pav. Rizikos lygmens vertinimas apjungiant tikėtinumą ir poveikį (Mahler, 2009)

Kai kuriose srityse (pvz., finansuose, medicinoje) rizika modeliuojama atkarpomis tiesine funkcija, kuri dar vadinama tiesiniu modeliu su slenksčiais. Investicijų portfelio optimizavimo uždaviniuose tokie modeliai naudojami kaip sudėtingesnių kvadratinų formų aproksimacijos. Įprasta, kad terminas „rizika“ tapatinamas su rizikos poveikio dimensija (pvz., išgyvenusių ir numirusių pacientų santykis, 3 pav.).



3 pav. Susirgimo rizikos funkcija, t – laikas, $\lambda(t)$ – rizika (Gandomi & Jandaghi, 2012)

Rizikos vertinimo fazėje taip pat priimami sprendimai dėl rizikos mažinimo veiksmų. Sprendimų dėl rizikos priėmimui dažnai naudojamas „šviesoforo“ modelis (Renn & Graham, 2005; Boyle, 1999). Rizikos lygmuo susiejamas su viena iš šviesoforo spalvų: raudona, geltona arba žalia. Raudona rizika yra netoleruotina, ją reikia spręsti. Geltonai rizikai reikia imtis mažinimo veiksmų. Žalia rizika yra priimtina, ją galima ignoruoti.

Tiesinį rizikos modelį ir šviesoforo principą galima panaudoti modeliuojant norminės taisyklės pažeidimą (pažeidimo riziką). Kadangi norminės taisyklės pažeidimo pasekmių katastrofiškumui įvertinti nepakanka vien tik radaro ir lidaro duomenų, šiame darbe rizikos sąvoka tapatinama su rizikos tikėtinumų dimensija.

1.4. Sprendimų parama realaus laiko sistemose

Sprendimo priėmimas (angl. *decision making*) – tai procesas, kurio metu pasirenkama alternatyva arba tam tikrai alternatyvai suteikiamas prioritetas. Sprendimo priėmimas yra samprotavimo procesas, todėl dauguma sprendimo priėmimo modelių grindžiami žmogaus pažinimo (angl. *cognitive*) procesais. Tradicinė sprendimų priėmimo samprata yra tiesinė (Sternberg, 1977): pateikiama seka žingsnių, padedančių sprendimo priėmėjui priimti geriausią iš visų įmanomų alternatyvų. Informacijos kodavimo žingsnis, kai išoriniai dirgikliai išverčiami į vidines (minčių) struktūras, trunka ilgiausiai (Azuma et al., 2006).

Realaus laiko sprendimų priėmimo modeliai dažniausiai nagrinėjami karinėje srityje (Pascual & Henderson, 1997). Yra du pagrindiniai sprendimų priėmimo modeliai: racionalusis ir natūralistinis. Racionalusis modelis paremtas prielaida, kad sprendimo priėmėjas turi visą informaciją apie situaciją, žino visus alternatyvius sprendimus su jų pasekmėmis ir tikimybėmis bei siekia maksimizuoti naudą. Natūralistinis sprendimų priėmimo modelis pabrėžia realaus pasaulio procesus (kontekstą), įtakojančius sprendimo priėmimą ir didelį dėmesį skiria procesams prieš apsisprendžiant – pvz., kaip individai suvokia esamą situaciją (Šarkutė, 2009).

Ne kiekvienas modelis tinkamas visose situacijose. Sprendimų priėmimo modelio parinkimas priklauso nuo tokių faktorių kaip laikas, per kurį turi būti priimtas sprendimas, sprendimų optimizavimo lygis, kiek dėmesio galima skirti sprendimo pasekmių analizei, kaip patirtis įtakoja sprendimo priėmimą ir kt. (Azuma et al., 2006).

Žmogaus pažinimo procesų ir realaus laiko sprendimo priėmimo modelių analizė parodo, kad reikėtų padėti naudotojams suvokti informaciją, galbūt, pateikiant intuityvesnes vizualizacijas. Kadangi paveikslai (vaizdai) gali būti interpretuojami greičiau negu tekstas, kiek galima daugiau informacijos turėtų būti pateikiama grafiškai. Formalius procedūrų reikalavimus reiktų pateikti taip, kad naudotojui būtų paprasčiau juos interpretuoti.

1.5. Vizualizavimas skrydžių valdymo srityje

Modeliavimo požiūriu artėjimo tūpti ir išvykimo procedūros nustato santykį tarp lėktuvo kurso, atstumo nuo kilimo-tūpimo tako ir aukščio virš jūros lygio. Taigi reikalinga tinkama šio santykio vizualizacija.

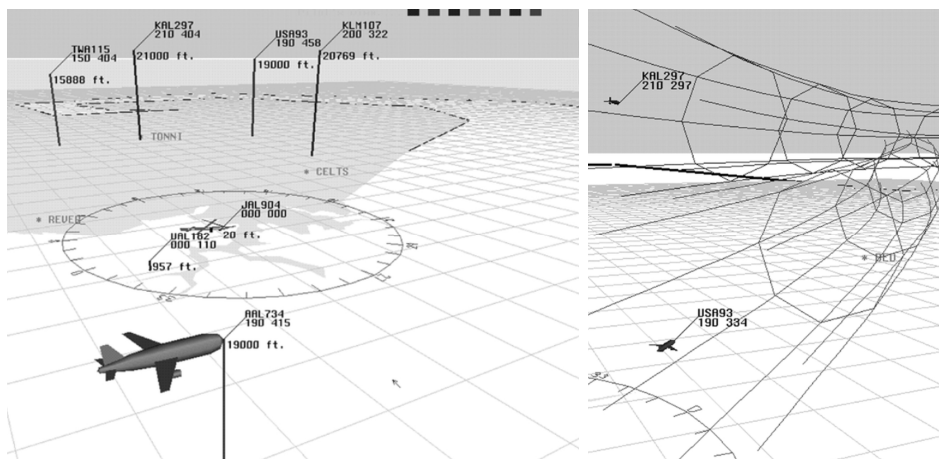
Dabartiniuose dvimačiuose (toliau – 2D) radaro ekranuose kombinuojama grafinė ir tekstinė informacija. Lėktuvo horizontali pozicija rodoma grafiškai, o aukštis užrašomas tekstu. Skrydžių vadovas skaito tekstą ir mintyse sukonstruoja situacijos trimatį (toliau – 3D) modelį. Naujos 3D vizualizacijos grafiškai parodo ir aukščio informaciją, todėl nereikia papildomų pastangų tekstinei aukščio informacijai interpretuoti. Tačiau 3D vaizdai turi ir trūkumų: sunkiau suvokti horizontalius atstumus, stebėti viso sektoriaus vaizdą, toli nuo žiūrėjimo taško esantys objektai atrodo maži, todėl sudėtingiau vertinti situaciją (Wong et al., 2007).

Siekiant išvengti minėtų trūkumų, analizuojamos šios 3D vizualizacijos aviacijoje:

- erdvės ir laiko kubas (Kraak, 2003);
- vizualizacijos laisvo skrydžio (angl. *free flight*) koncepcijai (Azuma et al., 1996);
- vizualizacijos iš projekto „3D-in-2D Planar Displays for ATC“ (Rozzi et al., 2007).

Erdvės ir laiko kubas (angl. *space-time cube*, STC) naudojamas vizualizuoti judėjimą laiko-erdvės kontekste. Horizontalioje ašyje vaizduojama objekto pozicija (2D) ir jos pasikeitimai. Vertikalioje ašyje vaizduojamas laikas, praleistas tam tikroje pozicijoje. STC padeda analizuoti objekto judėjimą, ieškoti pasikartojančių judėjimo modelių. Vaizdžiai parodomas greitis: nuožulnios atkarpos rodo greitą judėjimą, o stačios – lėtą. STC susieja horizontalią poziciją su laiku. Skrydžių vadovo sistemoje analizuojama 3D pozicija, todėl erdvės-laiko kubas nėra tinkamas.

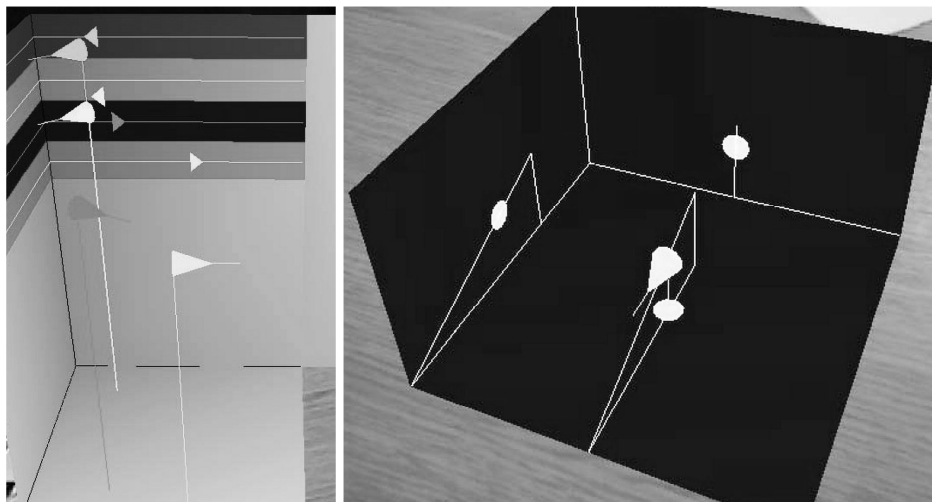
Laisvo skrydžio 3D vizualizacijos buvo sukurtos Bostono oro uostui (Azuma et al., 1996). Yra galimybė stebėti tiek bendrą vaizdą, tiek vaizdą iš vieno piloto perspektyvos (4 pav.). Numatoma lėktuvo trajektorija rodoma kaip „tunelis danguje“. Šiuo būdu skrydžių vadovo sistemoje galėtų būti vizualizuojama artėjimo tūpti/išvykimo procedūros nustatyta „norminė trajektorija“.



4 pav. Laisvo skrydžio vizualizacijos pavyzdžiai – momentinės ekrano kopijos (Azuma et al., 1996)

Projekte „3D-in-2D Planar Displays for ATC“ buvo tiriama, kaip viename ekrane integruoti 3D ir 2D vaizdus, kad būtų matyti ir kontekstas, ir skrydžių vadovui reikalinga erdvinė informacija (Rozzi et al., 2007). Buvo pasiūlytos kelios strategijos:

- 2D ekrane pasirinkti sritį, kurioje vaizduojama 3D informacija;
- 3D ekrane rodyti 2D „sienas“, kuriose yra lėktuvų projekcijos (5 pav.);
- naudoti praplėstos realybės (angl. *augmented reality*) priemones.



5 pav. Vizualizacijos su apjungtais 3D ir 2D vaizdais – momentinės ekrano kopijos (Rozzi et al., 2007)

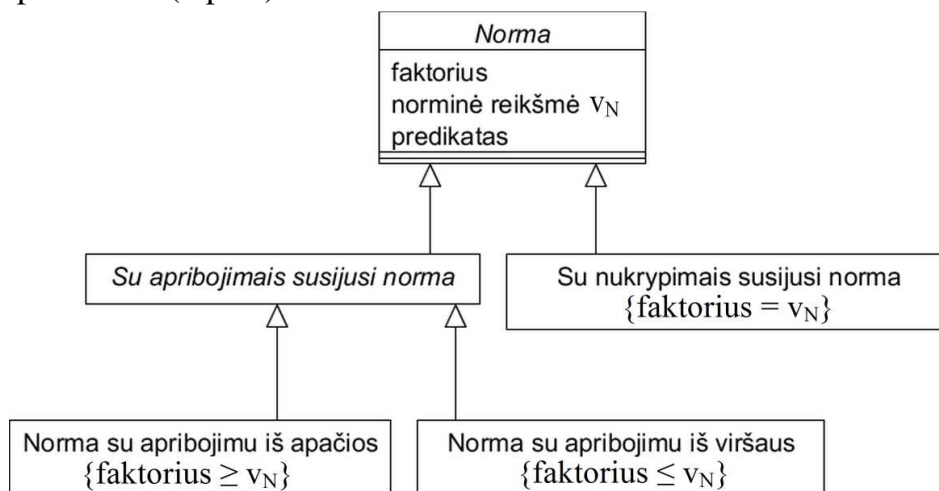
Vizualizacijoms, kuriose apjungiami 3D ir 2D vaizdai (5 pav.), reikalinga tiksli lėktuvo pozicija siekiant aptikti nukrypimą nuo norminės trajektorijos. Vien radaru grindžiamose sistemose jos būtų neprasmingos. Lidaras pateikia tikslią lėktuvo poziciją, ir ją galima vizualizuoti skrydžių vadovo SPS kartu su papildoma informacija 2D projekcijose.

2. Norminės taisyklės pažeidimo modeliavimas

2.1. Norminės taisyklės modeliavimas

Skrydžių oro uosto zonos norminiame reguliavime gali būti išskirtos normos, kurių pažeidimo tikėtinumą galima įvertinti tik turint lėktuvo poziciją ir greitį. Tokių kilimo/tūpimo norminių taisyklių rinkinį galima pavadinti „geometrinėmis normomis“. Tai normos, reglamentuojančios saugų intervalą, valkties turbulencijos vengimą, aukščio, horizontalios pozicijos ir greičio apribojimus kilimo/tūpimo metu, procedūros horizontalų bei vertikalų profilį ir kt.

Kiekviena iš šių normų reglamentuoja tam tikrą trajektorijos parametą arba įtvirtina jo apribojimą – pvz., „greitis turi būti ne daugiau kaip 210 mazgų“. Todėl šiame darbe siūloma modeliuoti norminę taisyklę kaip trejetą: normos faktorius, norminė reikšmė ir predikatas (6 pav.).



6 pav. Norminės taisyklės modeliavimas

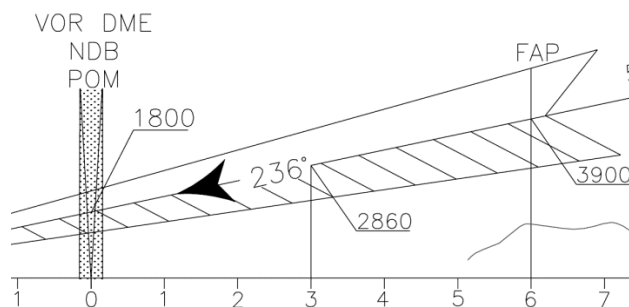
Faktorius yra kuris nors pamatuojamas trajektorijos(ų) parametras. Normoje paprastai apibrėžiama tam tikra norminė reikšmė (pvz., 210 mazgų, 3° ir pan.). Predikatas nurodo, kokiam santykiuje yra stebima faktoriaus reikšmė su normine:

- $\leq v_N$ – stebima reikšmė turi būti *ne didesnė* už norminę;
- $\geq v_N$ – stebima reikšmė turi būti *ne mažesnė* už norminę;
- $= v_N$ – stebima reikšmė turi būti *lygi* norminei.

Normos, turinčios pirmuosius du santykius, sudaro su apribojimais susijusių normų grupę, o trečiąjį – susijusių su nukrypimais normų grupę.

Su apribojimais susijusios norminės taisyklės pavyzdys: „mažiausiai 5,6 km (3,0 NM) intervalas turi būti išlaikomas tarp lėktuvų, esančių tame pačiame ILS kurse“ (ICAO Doc 4444, 2007, p. 123). Predikatas yra $\geq v_N$. Su nukrypimais susijusios norminės taisyklės pavyzdys galėtų būti glisada (nusileidimo kampas), kuri nurodoma artėjimo tūpti procedūrose, pvz., „GP 3,33 $^\circ$ “ (VATITA, 2003, schema nr. 349).

Kai kurioms normoms santykio apibrėžimas gali būti nevienareikšmis. Pavyzdžiui, aukščio apribojimai artėjimo tūpti procedūroje (7 pav.). Procedūra nurodo minimalų leistiną aukštį, pvz., „3900 pėdų esant 6 jūrmylių atstumu nuo DME įrenginio“. Taigi, ši norminė taisyklė turėtų būti interpretuojama kaip susijusi su apribojimu. Tačiau, jei lėktuvo aukštis bus daug didesnis negu nurodyta procedūroje, gali nepavykti nusileisti. Todėl šią norminę taisyklę galima interpretuoti ir kaip susijusią su nukrypimu.



7 pav. Aukščio apribojimai artėjimo tūpti procedūroje (VATITA, 2003, schema nr. 351)

Siūlomas modelis identifikuoja du normos tipus: susijusi su apribojimais ir susijusi su nukrypimais. Matematiškai su nukrypimais susijusią normą būtų galima apibrėžti kaip dviejų su apribojimais susijusių normų komplektą: „ v_N “ = „ $\geq v_N$ “ + „ $\leq v_N$ “. Du atskiri tipai buvo palikti siekiant turėti paprastą modelį ir nenutolti nuo dalykinės srities terminų. Papildomi abstrakcijos lygiai trukdytų skrydžių vadovams suprasti modelį. Kita vertus, abstraktesnė interpretacija galėtų būti naudojama sistemos realizacijoje.

2.2. Normos pažeidimo modeliavimas ir vizualizavimas

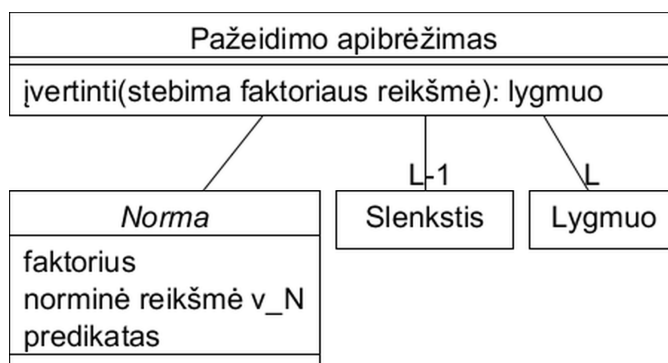
Ankstesniame poskyryje nusakyta tik pati norminė taisyklė. Toliau bus kalbama apie jos pažeidimą. Siūlomame modelyje vertinamas norminės taisyklės pažeidimo tikėtinumas, nes patikimai įvertinti pažeidimo pasekmės neužtenka vien radaro ir lidaro parodymų. Pasekmių (tikėtinos žalos) rimtumo įvertinimas būtų atskiras už šios disertacijos ribų išeinantis uždavinys. Tikėtinumą vertinamas pagal atstumą iki pažeidimo. Tai atitinka „atitikties požiūrį“ pagal (Kuchar, 2001).

Atskiro pažeidimo vertinimas atvaizduoja stebimą faktoriaus reikšmę į vieną iš diskrečių lygmenų. Mažiausiai lygmenų gali būti du: „nėra“ ir „yra“. To neužtenka sprendimų paramai. Didesnis lygmenų skaičius sudarytų galimybę prioritetizuoti situacijas. Taip pat yra poreikis turėti tam tikrą aukštesnio lygmens indikaciją, kol dar norminė taisyklė nepažeista, bet esama netoli pažeidimo. SPS prototipe naudojami lygmenys, atitinkantys „šviesoforo“ spalvas (raudona, geltona ir žalia), bet lygmenų gali būti ir daugiau.

Siekiant vizualiai parodyti pažeidimo apibrėžimą, naudojamos reitingavimo funkcijos, kurios atvaizduoja stebimą faktoriaus reikšmę į skaičių iš intervalo $[0, 1]$. Nulis reiškia žemiausią tikėtimumo lygmenį, o 1 – didžiausią. Ši funkcija tik modeliuoja tikėtinumą, o tikra tikimybė pažeisti norminę taisyklę yra nežinoma. Reitingavimo

funkcija pasirinkta atkarpomis tiesinė funkcija su slenksčiais. Tokio paprasto modelio užtenka, nes reikalingas diskretus lygmuo, o ne tikimybė.

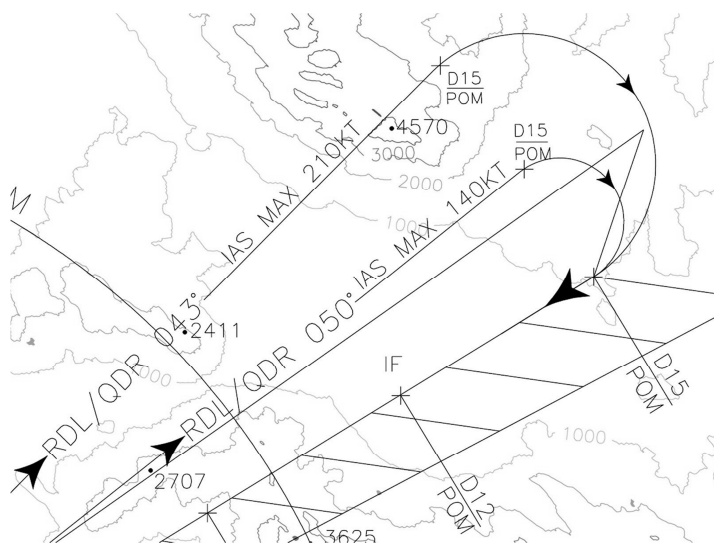
L diskrečių lygmenų įvertis susieja modeliuojamą normą su L-1 slenksčių (8 pav.).



8 pav. Norminės taisyklės pažeidimo modeliavimas

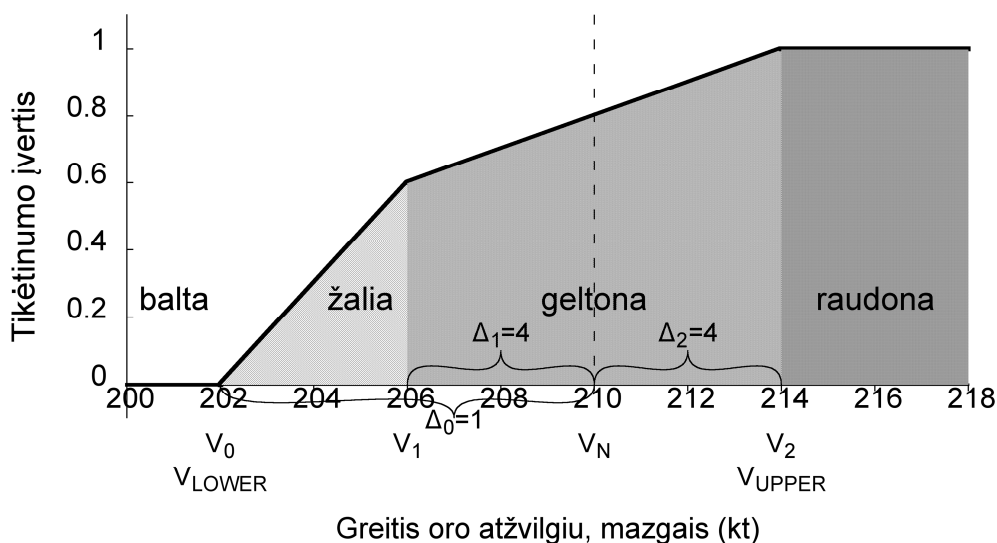
Pažeidimą nusako šie penki parametrai: 1) normos faktorius, 2) predikatas, 3) norminė reikšmė, 4) tipas („apribojimas“ arba „nukrypimas“) ir 5) slenksčių aibė. Jei tipas „apribojimas“, tai slenksčių aibę sudaro L-1 konstanta, o jei „nukrypimas“ – L-1 konstantų pora. Pateikiamuose pavyzdžiuose slenksčiai parinkti tik demonstravimo tikslais – juos turi parinkti dalykinės srities ekspertai.

Su apribojimais susijusios normos pavyzdys – greitį reglamentuojanti norma (9 pav.). Apibrėžti keturi (L = 4) lygmenys: „balta“ (minimalus tikėtinumumas), „žalia“ (toleruotinas tikėtinumumas), „geltona“ (reikia imtis prevencinių veiksmų) ir „raudona“ (maksimalus tikėtinumumas). Yra trys (L-1) slenksčiai (10 pav.): v_0 (v_{LOWER}) – slenkstis nuo kurio įvertis pradeda didėti, v_1 ir v_2 (v_{UPPER}) – slenkstis maksimaliam įverčiui. Slenksčius galima išreikšti ir kaip nukrypimus nuo norminės reikšmės v_N : $v_0 = v_N - \Delta_0$, $v_1 = v_N - \Delta_1$, $v_2 = v_N + \Delta_2$ (žr. turbulencijos pažeidimo apibrėžimą 4.2.2 skirsnyje).



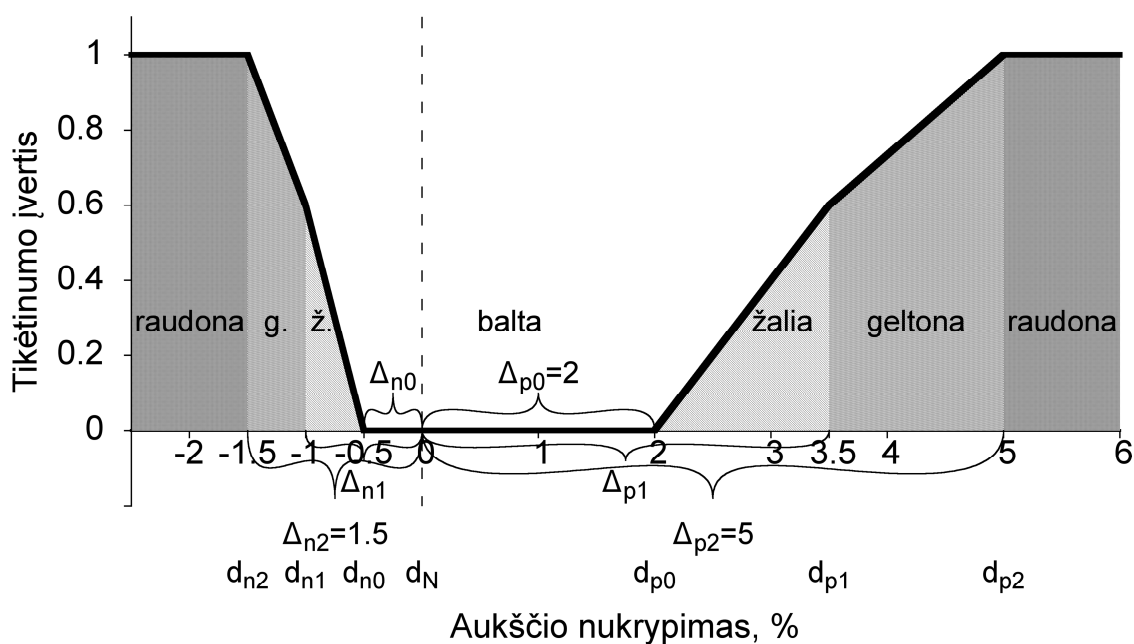
9 pav. Greičio apribojimas artėjimo tūpti procedūroje (VATITA, 2003, schema nr. 351)

Greičio apribojimo pažeidimo apibrėžimas: 1) faktorius: „greitis oro atžvilgiu“; 2) predikatas: $\leq v_N$; 3) norminė reikšmė: 210 kt; 4) tipas: „apribojimas“; 5) slenksčiai: $v_0 = 202$ kt, $v_1 = 206$ kt, $v_2 = 214$ kt.



10 pav. Greičio pažeidimo modeliavimas

Su nukrypimais susijusios normos pavyzdys – aukštį reglamentuojanti norma artėjimo tūpti procedūroje (7 pav.). Vertinant pažeidimą svarbi ne absoliuti faktoriaus reikšmė, o nukrypimas nuo norminės. Nukrypimas turi būti nulis ($d_N = 0$). Apibrėžiami keturi lygmenys ir trys poros slenksčių (11 pav.): d_{n0} ir d_{p0} (slenksčiai nuo kurių įvertis pradeda didėti), d_{n1} ir d_{p1} , bei d_{n2} ir d_{p2} (slenksčiai maksimaliam įverčiui). Slenksčiai d_{ni} yra skirti reikšmėms, mažesnėms už norminę, o d_{pi} skirti reikšmėms, didesnėms už norminę. Šiuos slenksčius galima išreikšti kaip nukrypimus nuo norminės reikšmės: $d_{n0} = d_N - \Delta_{n0}$, $d_{p0} = d_N + \Delta_{p0}$, $d_{n1} = d_N - \Delta_{n1}$, $d_{p1} = d_N + \Delta_{p1}$, ir $d_{n2} = d_N - \Delta_{n2}$, $d_{p2} = d_N + \Delta_{p2}$.



11 pav. Aukščio pažeidimo modeliavimas

Aukščio pažeidimo apibrėžimas: 1) faktorius: „aukštis“; 2) predikatas: $=v_N$; 3) norminė reikšmė: 3900 pėdų 6 NM atstumu nuo DME įrenginio (nukrypimas 0); 4) tipas: „nukrypimas“; 5) slenksčiai: $d_{n0} = -0.5$, $d_{p0} = 2$, $d_{n1} = -1$, $d_{p1} = 3.5$, $d_{n2} = -1.5$, $d_{p2} = 5$.

Pažeidimo vizualizavimas. „Šviesoforo“ modelis yra naudojamas pažeidimo vizualizavimui ir sprendimų paramai. Kiekvienam pažeidimo apibrėžimui kuriamas atskiras spalvotas indikatorius SPS prototipo valdymo skydelyje. Kaip ir įprastame „šviesoforo“ modelyje, raudona spalva signalizuoja, kad reikalingi korekciniai veiksmai, geltona atkreipia dėmesį į galimą pažeidimą, o žalia žymi nukrypimą, į kurį šiuo metu galima nekreipti dėmesio. Pridedama papildoma spalva – balta – žymėti pažeidimui, kuris įvertintas nulių, arba šiuo metu neaktualus. Lygmenys susiejami su spalvomis. Indikatoriai gali būti tolydūs arba diskretūs (12 pav.). Diskrečiame indikatoriuje skilčių yra viena mažiau negu apibrėžta lygmenų. Tokius indikatorius prasminga naudoti tada, kai lygmenų skaičius yra didesnis (pvz., 8 ir daugiau).



12 pav. Pažeidimo indikatorių pavyzdžiai

Siūlomame modelyje kiekvieno pažeidimo įvertis vizualizuojamas atskiru indikatoriumi. Tolimesnis žingsnis būtų apibrėžti metodą, kaip apjungti visus indikatorius ir agreguoti informaciją, pateikiamą naudotojui. Šis klausimas turi du aspektus: 1) atskirtų norminių taisyklių pažeidimų agregavimas ir 2) esamo ir numatomo pažeidimo agregavimas. Pastarasis turėtų priklausyti nuo numatymo tikslumo ir patikimumo. Detalus šio klausimo nagrinėjimas išeina už šios disertacijos ribų. Atskirų norminių taisyklių pažeidimų agregavimas SPS prototipe realizuotas panaudojant principą „kiekvienam lėktuvui apibendrinta spalva lygi blogiausiai spalvai iš visų tam lėktuvui įvertintų pažeidimo spalvų“. Viena iš pasiūlytų vizualizavimo modelių lėktuvo indikatorius pagrindiniame 3D lange keičia spalvą priklausomai nuo apibendrintos spalvos.

2.3. Normos pavaizdavimo sprendimų paramos sistemoje žingsniai

Modeliuojant norminės taisyklės pažeidimą SPS, atliekami šie žingsniai:

1. Apibrėžiami įverčio lygmenys:
 - 1.1. Nustatomas lygmenų skaičius, L.
 - 1.2. Kiekvienas lygmuo susiejamas su „šviesoforo“ spalva (balta, žalia, geltona ir raudona).
2. Modeliuojama norminė taisyklė:

- 2.1. Apibrėžiamas faktorius, norminė reikšmė ir predikatas. Į faktoriaus apibrėžimą įeina ir modeliavimas, kaip stebima faktoriaus reikšmė bus apskaičiuojama iš SPS įeities duomenų.
- 2.2. Sukuriamas pažeidimo apibrėžimas: nustatomi $L-1$ slenksčiai (jei tipas „apribojimas“) arba slenksčių poros (jei tipas „nukrypimas“).
3. Sukuriamas pažeidimo indikatorius kiekvienam pažeidimo apibrėžimui.

2.4. Išvados

Sprendimų parama lėktuvo kilimo/tūpimo fazėse nagrinėjama tikėtinumo pažeisti normines taisykles kontekste. Pasirinktas „atitikties požiūris“ – tikėtinumas vertinamas pagal tai, kaip arti pažeidimo yra stebima situacija. Identifikuoti du norminių taisyklių tipai: susijusios su apribojimais ir susijusios su nukrypimais. Kiekviena norminė taisyklė modeliuojama kaip trejetas: faktorius, norminė reikšmė ir predikatas. Pažeidimo apibrėžimas susieja modeliuojamą norminę taisyklę su slenksčiais ir diskrečiais lygmenimis. SPS prototipe kiekvienam pažeidimo apibrėžimui sukuriama atskiras indikatorius, kuriame lygmuo paverčiamas į vieną iš „šviesoforo“ modelio spalvų.

3. Sprendimų paramos sistemos prototipas

3.1. SPS prototipo apimtis ir duomenų modelis

SPS prototipas buvo sukurtas siekiant tirti ir pademonstruoti siūlomą metodą. SPS prototipas demonstruoja:

- Pasirinktų norminių taisyklių pažeidimo modeliavimą.
- Pažeidimo vertinimą šioms normoms.
- Oro erdvės ir stebimų lėktuvų vizualizavimą.
- Aptiktų pažeidimų pateikimą skrydžių vadovui.

Prototipas šiuo metu pritaikytas dviem oro uostams: Peskaros (miestas pietų Italijoje) ir Neapolio. Neapolio Kapodičino oro uosto vienos dienos radaro archyviniai duomenys panaudoti imitavimui ir prototipo patikrinimui. Kadangi lidaras dar tik bandomas naudoti lėktuvų stebėjimui, tyrimui nebuvo prieinami tokie duomenys, kuriuose tie patys skrydžiai būtų užfiksuoti ir radaru, ir lidaru. Kai kuriose imitacijose panaudotos „dirbtinės“ trajektorijos, generuotos pagal radaro parodymus ir radaro/lidaro parametrus.

Išoriškai SPS prototipas turi imituoti realios SPS veikimą, t. y., SPS prototipas realiu laiku analizuoja pradinis duomenis ir informuoja apie galimus pažeidimus, atlieka radaro ir lidaro duomenų sintezę, prognozuoja lėktuvo trajektoriją iki tam tikro laiko ateityje bei parenka korekcinius veiksmus.

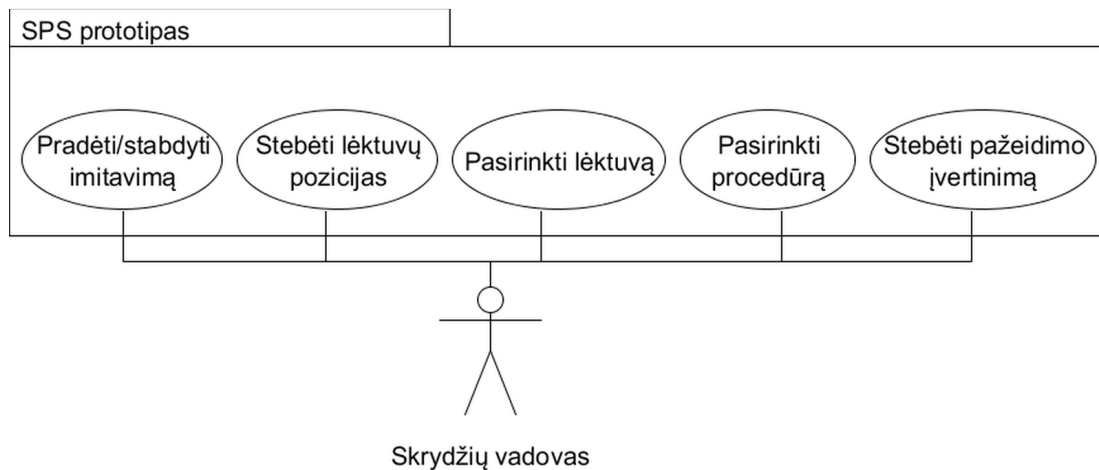
Didžiausias dėmesys skiriamas informacijos vizualizavimui. Prototipas sukurtas Matlab aplinkoje. Vizualizavimui naudojamas Matlab priedas „Virtual Reality Toolbox“, kuris leidžia Matlab algoritmus susieti su VRML (angl. *Virtual Reality Modeling Language*) objektais ir imitavimo metu keisti jų parametrus. Kūrimo aplinka turėjo įtakos kai kurių grafinės sąsajos objektų vizualizavimo būdo pasirinkimui.

13 pav. parodytos pagrindinės SPS prototipo užduotys. Vienu momentu kilimo-tūpimo taką gali naudoti tik vienas lėktuvas. Jis gauna skrydžių valdymo tarnybos leidimą (angl. *air traffic control clearance*) kilti arba tūpti. SPS prototipe yra daroma prielaida, kad lėktuvui yra priskirta kuri nors artėjimo tūpti/išvykimo procedūra. Prototipas suteikia galimybę stebėti pasirinkto lėktuvo nukrypimus nuo pasirinktos procedūros (procedūros pažeidimus). Kitų tipų pažeidimai (saugaus intervalo, valkties turbulencijos ir kt.) yra vertinami kiekvienu laiko momentu visiems lėktuvams.

SPS prototipo architektūra sudaryta iš trijų sluoksnių:

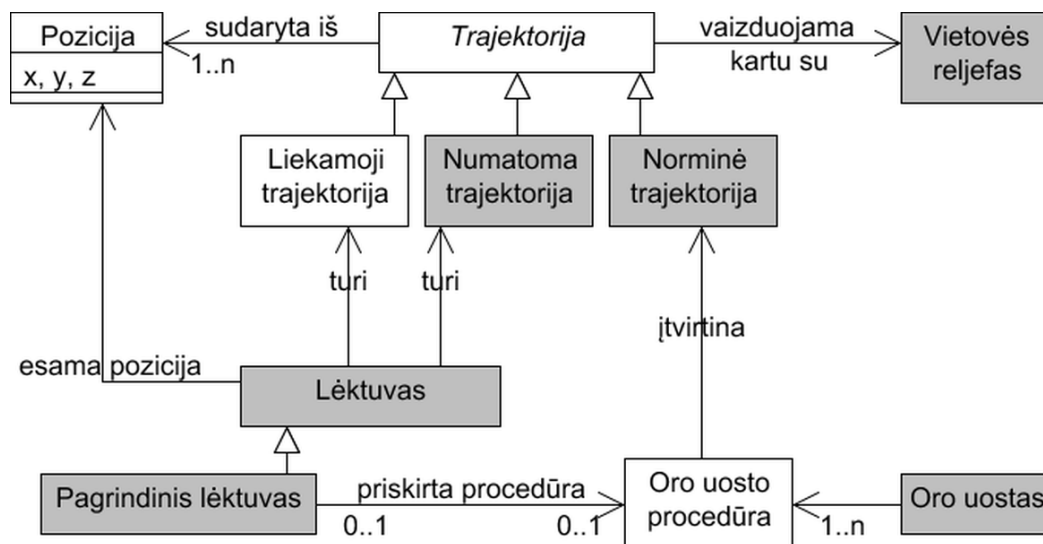
1. Naudotojo sąsajos sluoksnis.
2. SPS funkcionalumo sluoksnis.
3. Apsikeitimo duomenimis sluoksnis.

Kiekvienas sluoksnis veikia kaip serveris aukštesnio lygmens sluoksniui ir kaip žemesnio lygmens sluoksnio klientas.



13 pav. SPS prototipo užduočių diagrama

SPS prototipo duomenų modelis parodytas 14 pav. Pagrindinė esybė, su kuria dirba SPS prototipas, yra *trajektorija*. Trajektorija yra 3D *pozicijų* seka. Oro uostas, kuriam pritaikytas SPS prototipas, turi savo artėjimo tūpti/išvykimo *procedūrų* rinkinį. Kiekviena procedūra įtvirtina tam tikrą *norminę trajektoriją* (privalomą, angl. „*ought-to-be*“). Modeliuojant ją SPS procedūros aprašas transformuojamas į 3D pozicijų seką. Stebimas lėktuvas turi *dabartinę poziciją*, iš ankstesnių pozicijų sudarytą *liekamąją trajektoriją*, ir *numatomą trajektoriją* (jei „įjungtas“ numatymas). Vienas iš stebimų lėktuvų gali būti pasirinktas kaip *pagrindinis lėktuvas*. Kai tam tikra procedūra priskiriama pagrindiniam lėktuvui, SPS prototipas vertina nukrypimą nuo norminės trajektorijos („trajektorijos pažeidimą“) pagal tą procedūrą.



14 pav. SPS prototipo duomenų modelis

Daroma prielaida, kad reali SPS bus bendros oro uosto sistemos posistemis – gaus duomenis apie lėktuvų pozicijas, o grąžins patikslintas pozicijas, pažeidimų vertinimo rezultatus ir siūlomus veiksmus. SPS prototipas keičiasi duomenimis su išorinėmis sistemomis CSV formato failais. Viena eilutė CSV faile atitinka vieną *duomenų įrašą*.

Ivedimo duomenų įrašė yra arba radaro duomenys, arba lidaro duomenys apie lėktuvo poziciją. Išvedimo duomenų įrašą sudaro patikslinta pozicija ir pažeidimo įvykio informacija, jei pažeidimas buvo nustatytas atitinkamai įvedimo pozicijai.

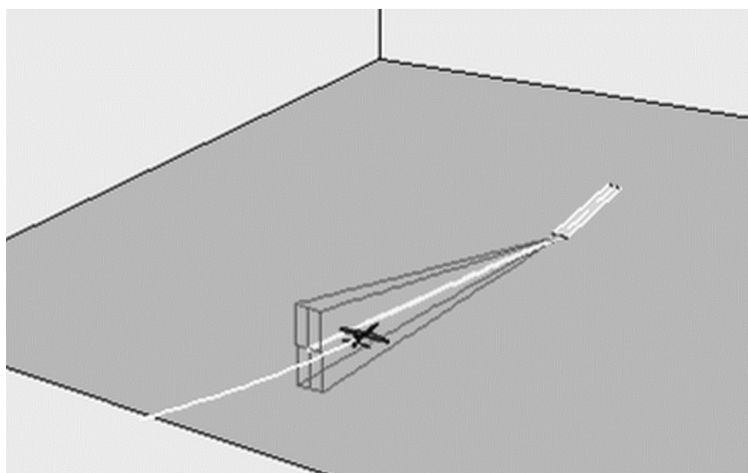
3.2. SPS prototipo naudotojo sąsajos projektavimas

Naudotojo sąsajos projektavimo metu buvo išskirtos esybės, kurios vizualizuojamos SPS prototipo sąsajoje: lėktuvas, pagrindinis lėktuvas, prognozuojama trajektorija, procedūroje apibrėžta norminė trajektorija, oro uostas ir jį supančios vietovės reljefas. Šios esybės 14 pav. pažymėtos pilkai.

SPS prototipas vienu metu teikia daug informacijos – lėktuvų koordinatas, buvusias ir numatomas trajektorijas, perspėjimus apie grėsmes ir kt. Dalis informacijos paprastai pateikiama atskirame (skrydžių duomenų) ekrane. Tačiau dėmesio perkėlimas iš vieno ekrano į kitą užima laiko. Iš vienos pusės siūloma visą reikalingą informaciją vizualizuoti tame pačiame ekrane. Pavyzdžiui, su skrydžiu susijusi informacija „prikabinama“ prie vizualizuojamo lėktuvo ir skrydžių vadovas ją randa mažiausiomis pastangomis (Lange et al., 2003). Iš kitos pusės skrydžių vadovams svarbu neperkrautas ekranas – be dėmesį blaškančių detalių. Taigi svarbu vizualizuoti visą informaciją ir kuo mažesnėmis priemonėmis bei neperkraunant ekrano. Toliau aptariamos išskirtų prototipo sąsajoje objektų vizualizavimo alternatyvos.

Lėktuvas yra pagrindinis objektas SPS prototipo sąsajoje. Jo indikatorius žymi esamą lėktuvo poziciją žemės reljefo atžvilgiu. Lėktuvai gali būti vaizduojami įvairiu detalumu – kaip taškai (3D – rutuliukai), kūgiai ar 3D lėktuvų modeliai. Kūgis pranašesnis už vaizdavimą tašku, nes kūgio smaigalys nurodo lėktuvo kryptį. Vaizduojant lėktuvą 3D modeliu galima vizualiai atpažinti lėktuvo tipą ir dalį kitos informacijos, pvz., oro linijų ženklą (Bourgois et al., 2005), tačiau toks detalumas gali blaškyti. „Integruotame 2D/3D“ prototipe kaip indikatoriai naudojami rutuliukai ir skrituliai, o „gryname 3D“ prototipe – lėktuvo 3D modelis. Norint 3D modelį nukreipti į reikiamą pusę, reikalingi papildomi skaičiavimai.

Liekamosios trajektorijos. Senesniuose radarų ekranuose lėktuvo pozicija buvo vaizduojama tašku. Atsiradus naujam radaro rodmeniui, ekrane likdavo nykstantys ankstesniųjų rodmenų pėdsakai. Pagal šiuos pėdsakus skrydžių vadovai vertindavo lėktuvo kryptį ir greitį (Wong et al., 2007). Sistema galėtų būti priimtinesnė naudotojams, jei būtų vizualizuojamos lėktuvų liekamosios trajektorijos. Jos gali būti vaizduojamos ir ištisinėmis kreivėmis (Lange et al., 2003). Vaizdavimas linijomis ir taškais buvo išbandytas pirmuosiuose SPS prototipuose (15 pav.). Tyrimai parodė, kad liekamosios trajektorijos vizualizavimas linijomis turi ir privalumų, ir trūkumų žmogaus-kompiuterio sąveikos požiūriu. Prototipo kūrimo aplinkoje tokias linijas yra sudėtinga pavaizduoti. Be to, linijas, kurios atrodo suprantamos 2D vaizde, nepatogu interpretuoti 3D vaizde.



15 pav. Liekamosios trajektorijos vizualizavimo pavyzdys (baltos linijos žymi norminę trajektoriją ir liekamąją trajektoriją)

Numatomos trajektorijos. Kadangi SPS turi nuspėti lėktuvo poziciją iki tam tikro laiko ateityje siekiant vertinti pažeidimą, numatomą trajektoriją reikia ir vizualizuoti. Esamose sistemose numatoma trajektorija dažniausiai vaizduojama atkarpa, prasidedančia lėktuvo dabartinėje pozicijoje ir perpiešiama kiekvieną kartą, kai gaunami nauji duomenys apie lėktuvo poziciją. Kai kurie autoriai siūlo numatomą poziciją rodyti netikru lėktuvu (angl. *ghost*) tikrojo lėktuvo priekyje. „Integruotame 2D/3D“ vizualizavimo modelyje numatoma trajektorija vizualizuojama kaip seka „netikrų rutuliukų“: pirmasis rodo numatomą poziciją po 1 sekundės, antrasis – po 2 sekundžių ir t. t. Kadangi „netikri rutuliukai“ apkrauna vaizdą, numatymo vizualizavimas gali būti įjungtas arba išjungtas iš sistemos valdymo skydelio. „Gryname 3D“ prototipe numatomos trajektorijos vizualizavimas nerealizuotas.

Vietovės reljefas. Vienas iš 3D vizualizavimo pranašumų yra patogus lėktuvo aukščio nuo žemės paviršiaus (angl. *ground separation*) parodymas (Rozzi et al., 2007). Kita vertus, yra šaltinių, teigiančių, kad žemės paviršiaus vaizdavimas 3D modeliu neteikia papildomos informacijos ir reljefą galima vaizduoti vien spalvomis – kaip geografiniuose žemėlapiuose (Lange et al., 2003). Oro uostai, kurių duomenys naudojami SPS prototipe, yra šalia kalnų, todėl tiksliai vaizduoti žemės paviršių yra svarbu. „Integruotame 2D/3D“ prototipe vietovės reljefą vizualizuoja apibendrintas 3D modelis, o „gryname 3D“ – palydovinės vietovės nuotraukos.

Oro uosto procedūros (norminės trajektorijos) vizualizuojamos siekiant suteikti galimybę skrydžių vadovui vizualiai įvertinti nukrypimą nuo norminės trajektorijos, nežiūrint į valdymo skydelį. „Integruotame 2D/3D“ vizualizavimo prototipe norminė trajektorija vizualizuojama kaip linija ant projekcinės sienos, o „gryname 3D“ – kaip seka žiedų. Detaliai šie sprendimai pristatomi 4.1.2 ir 4.1.3 skirsniuose.

3.3. Sprendimų paramos procesas

Šiame poskyryje aprašomos sprendimų paramos proceso fazės. Pagrindinis tikslas yra modeliuoti norminės taisyklės pažeidimą. Šį uždavinį galima apibendrinti kaip sprendimų paramos uždavinį, kuris sprendžiamas konfliktinių situacijų aptikimo ir sprendimo sistemose. Todėl kaip pagrindą kuriamam sprendimų paramos procesui galima paimti konfliktinių situacijų aptikimo ir sprendimo proceso fazes iš (Kuchar & Yang, 2000). Šiuo atveju „konfliktinę situaciją“ galima apibrėžti kaip bet koki įvykį, kai lėktuvas nesilaiko saugaus atstumo iki kokio nors pavojaus. Kas apibrėžiama kaip „pavojus“ – seka iš modeliuojamos norminės taisyklės.

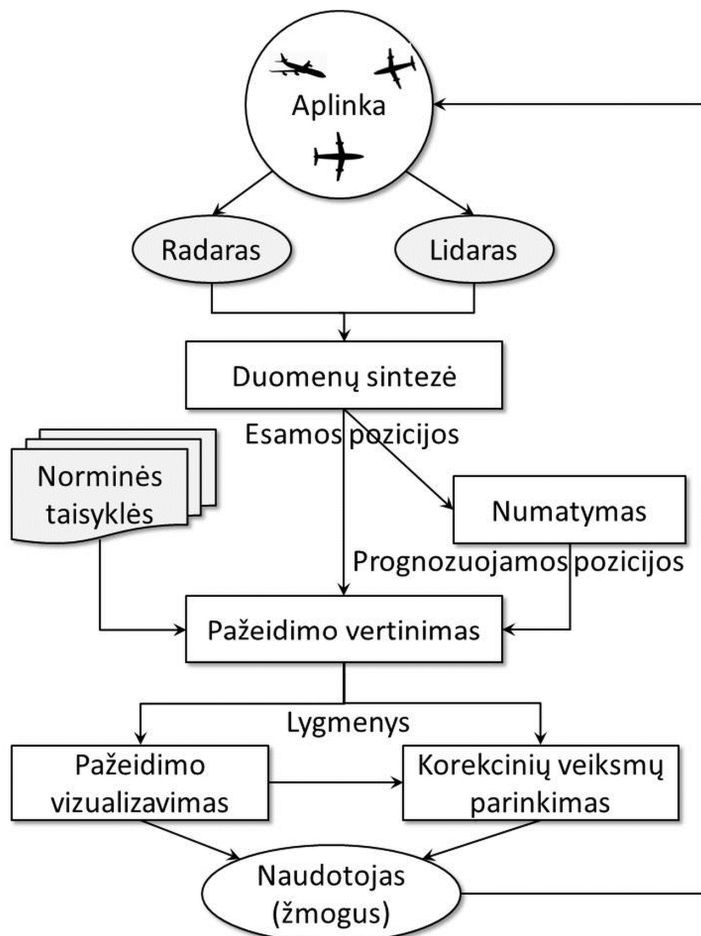
Toliau pateikiama Kuchar ir Yang, (2000) modelio interpretacija (16 pav.) ir trumpai apibūdinama kiekviena fazė.

Duomenų sintezė (būsenos stebėjimas). Duomenys apie lėktuvo poziciją gaunami iš dviejų įrenginių – radaro ir lidaro. Būsenos stebėjimo fazėje duomenys sujungiami ir pateikiama patikslinta pozicija. Gaunami duomenys ir apie horizontalią (H), ir apie vertikalią (V) poziciją (HV tipas pagal Kuchar ir Yang klasifikaciją). SPS prototipas realizuoja ne visus duomenų sintezės etapus. Daroma prielaida, kad iš išorės gaunami duomenys jau paruošti filtravimui. SPS prototipe duomenų sintezei panaudotas Kalmano filtras. Bendru atveju Kalmano filtras reikalauja iš anksto apibrėžti matavimo paklaidą ir proceso paklaidą. Matavimo paklaida radarui ir lidarui buvo nustatyta pagal prielaidas apie įrenginių tikslumą. Nustatyti proceso paklaidą paprastai yra sudėtingiau, jei neįmanoma tiesiogiai stebėti modeliuojamo proceso (lėktuvų trajektorijų). Proceso paklaida buvo nustatyta empiriškai, derinant filtro parametrus pagal vienos dienos radaro archyvo duomenis.

Numatymas (dinaminis modelis). Dinaminis modelis skirtas būsimoms lėktuvų pozicijoms numatyti. Trajektorijos numatymą skrydžių valdymo kontekste galima skirstyti į ilgalaikį (kelių valandų), vidutinį (keliasdešimties minučių) ir trumpalaikį (kelių minučių) (Chaloulos et al., 2009). Lėktuvo artėjimo tūpti ir išvykimo fazėse orientuojamasi į trumpalaikį ar ypač trumpalaikį numatymą (pvz., lėktuvo tūpimas įprastai trunka nuo 2 iki 5 minučių). Pasirinktas nominalus numatymo metodas (Kuchar & Yang, 2000), nes blogiausio atvejo ar tikimybinis metodas tokiu trumpu periodu neduotų apčiuopiamos naudos. Trajektorijos numatymo uždavinys yra skirtingas nuo duomenų sintezės uždavinio. Trajektorijos numatymui taip pat panaudotas Kalmano filtras, kadangi jis potencialiai gali prisiderinti prie trajektorijos posūkių geriau negu, pvz., tiesinė interpoliacija. Bandymai su turimais radaro duomenimis parodė, kad Kalmano filtras yra tinkamas numatyti tiek tiesias trajektorijas, tiek posūkius, kai lėktuvo greitis yra pastovus, arba kinta su pastoviu pagreičiu. Jei pagreitis kinta, atsiranda nukrypimai, bet jei pagreičio kitimas trunka neilgai, nukrypimai yra lokalūs ir neįtakoja tolimesnių numatytų reikšmių.

Pažeidimo vertinimas (matų apibrėžimai). Matai, naudojami SPS prototipo sprendimų paramos procese, yra pažeidimų apibrėžimai. Kiekvienai norminei taisyklei

sudaromi pažeidimų apibrėžimai. Pažeidimo vertinimas apskaičiuoja diskretų lygmenį kiekvienam pažeidimo apibrėžimui. Šie diskretūs lygmenys naudojami kaip sprendimų slenksčiai vėlesnėse fazėse.



16 pav. Siūlomos sprendimų paramos proceso fazės

Pažeidimo vizualizavimas (konfliktinės situacijos aptikimas). SPS prototipe konfliktinės situacijos aptikimo slenkstis yra neišreikštinis. Išskiriami keli diskretūs lygmenys, o ne vien tik konfliktinės situacijos buvimas/nebuvimas. Pažeidimo indikatorius kiekvienam apibrėžimui yra rodomas visada. Jis keičia spalvą priklausomai nuo to, koks yra to pažeidimo tikėtumo įvertis. Lygmeniui pasiekus raudoną spalvą, atitinkamam pažeidimui turi būti parinktas korekcinis veiksmas.

Korekcinio veiksmo parinkimas (konfliktinės situacijos sprendimo kontekste). Konfliktinės situacijos sprendimo žingsnis turi generuoti korekcinius veiksmus. Kadangi tyrimas sutelktas ties normų pažeidimo modeliavimu ir vizualizavimu, korekcinio veiksmo parinkimas apibrėžiamas tik eskiziškai. Manevrai, kurie bus pateikti kaip korekciniai veiksmai, yra apibrėžti iš anksto (angl. *prescribed*, tipas P pagal Kuchar ir Yang klasifikaciją). Jei pažeidimas susijęs su koku nors trajektorijos parametru, generuojamas veiksmas pataisyti tą parametru – padidinti ar sumažinti greitį (angl. *speed*, S), pasukti į kairę ar į dešinę (angl. *turn*, T), padidinti ar sumažinti aukštį (angl. *vertical*, V), bet negeneruojami kombinuoti manevrai (iš kelių veiksmų). Kai lėktuvas yra praskridęs įėjimo į glisadą tašką, generuojamas artėjimo tūpti nutraukimo

veiksmas. Veiksmai suprantami kaip patarimai skrydžių vadovui. SPS prototipe atgalinis ryšys iš žmogaus į korekcinio veiksmo parinkimo komponentą nėra numatytas.

3.4. Išvados

SPS prototipas įgyvendina ankstesniame skyriuje pasiūlytą norminės taisyklės pažeidimo modelį. Jis pateikia siūlomo sprendimo paramos scenarijaus realaus laiko demonstraciją. Sprendimų paramos procese identifikuotos penkios fazės: duomenų sintezė, trajektorijos numatymas, pažeidimo vertinimas, pažeidimo vizualizavimas ir korekcinį veiksmų parinkimas. Yra ne vienas būdas įgyvendinti bet kurią iš šių fazių. Šiame darbe akcentuojamas normos pažeidimo modeliavimas: kaip atrinktas normines taisykles vaizduoti SPS ir kaip pateikti pažeidimo vertinimo rezultatus naudotojui. Šiame darbe nesiekama pilnai apibrėžti kiekvieną fazę. Kadangi SPS prototipas realizuoja visą sprendimų paramos procesą, tam tikri sprendimai buvo priimti dėl kiekvienos fazės realizavimo. Jie yra nebūtinai optimalūs, be to, galimi ir kitokie sprendimai. Jų parinkimas galėtų būti tolimesnių tyrimų objektas.

4. Pasirinktų normų pažeidimo modeliavimas ir vizualizavimas

4.1. Artėjimo tūpti procedūrų modeliavimas

4.1.1. Naudojimo scenarijus

SPS prototipe oro eismo situacija – apibendrintas vietovės reljefas ir stebimų lėktuvų pozicijos – vizualizuojamos 3D lange. Atskirame 2D lange yra valdymo pultelis: naudotojo sąsajos mygtukai ir pranešimų sritis. SPS prototipo valdymo pultelis pateikia aktualią informaciją apie stebimus lėktuvus ir pažeidimų įverčius. Pažeidimai vizualizuojami spalvomis 3D lange ir paaiškinami pranešimų srityje.

Stebima oro erdvė gali būti rodoma dviem režimais:

- Negriežtos kontrolės režimas, kai SPS vertina tik kiekvieno lėktuvo aukščio pažeidimo ir saugaus atstumo iki kitų lėktuvų pažeidimą.
- Griežtos kontrolės režimas, kai pagrindiniam lėktuvui priskiriama tam tikra artėjimo tūpti/išvykimo procedūra, ir SPS vertina procedūros apribojimų (aukščio, greičio, kurso) pažeidimą tam lėktuvui.

Griežtos kontrolės režime priskirta procedūra vizualizuojama pagrindiniame 3D lange, kad naudotojas vizualiai patikrintų, ar lėktuvo pozicija atitinka norminę trajektoriją, nebūtinai žiūrėdamas į valdymo pultelį.

Kai lėktuvas gauna skrydžių valdymo tarnybos leidimą kilti/tūpti, SPS prototipas naudojamas pagal tokį scenarijų:

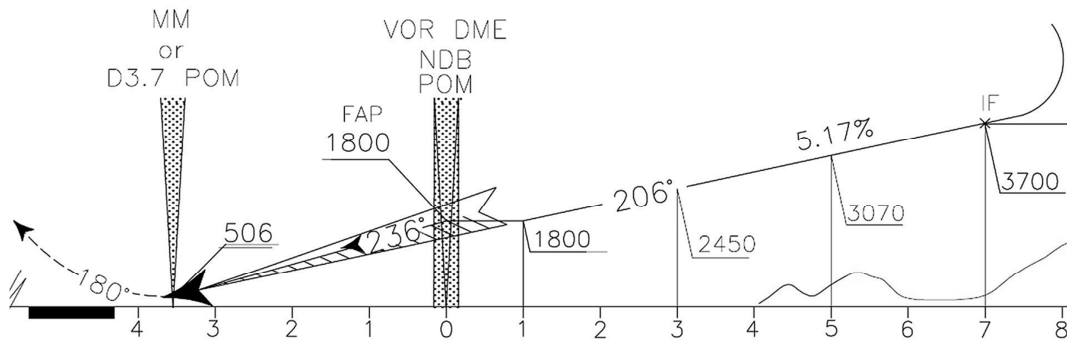
1. Priskirti artėjimo tūpti/išvykimo procedūrą: procedūra vizualizuojama. Čia buvo įgyvendinti du alternatyvūs būdai procedūrai vizualizuoti (žr. 4.1.2 ir 4.1.3).
2. Stebėti lėktuvo poziciją ir pažeidimų indikatorius.
3. Duoti nurodymus pilotui.

4.1.2. „Integruotas 2D/3D“ prototipas

Šiame vizualizavimo modelyje pasitelktos idėjos iš projekto „3D-in-2D Planar Displays for the ATC“ (Rozzi et al., 2007; Wong et al., 2007). Artėjimo tūpti procedūroje dalis apribojimų norminei trajektorijai pavaizduoti šoninėje projekcijoje (17 pav.). Šie apribojimai gali būti parodyti ant 2D sienos (projekcijų sienos).

Siūlomame vizualizavimo modelyje (18 pav.) oro erdvė padalinama į dvi dalis: virš nustatyto aukščio (praskridimo aukštis) erdvė skirta praskrendantiems lėktuvams, žemiau nustatyto aukščio skrenda lėktuvai, kurie gavo leidimą leisti oro uoste. Šios dalys pažymėtos skirtingomis spalvomis projekcijų sienose. Projekcijų sienos pusiau permatomos, kad neužstotų aplinkinio vaizdo. Vaizduojamas apibendrintas reljefo modelis, kad detalės neblaškytų dėmesio. Vienas iš modeliujamų oro uostų yra šalia kalnų, todėl naudinga 3D modeliu vizualizuoti reljefo aukštį. Reljefo ypatumai – jūros

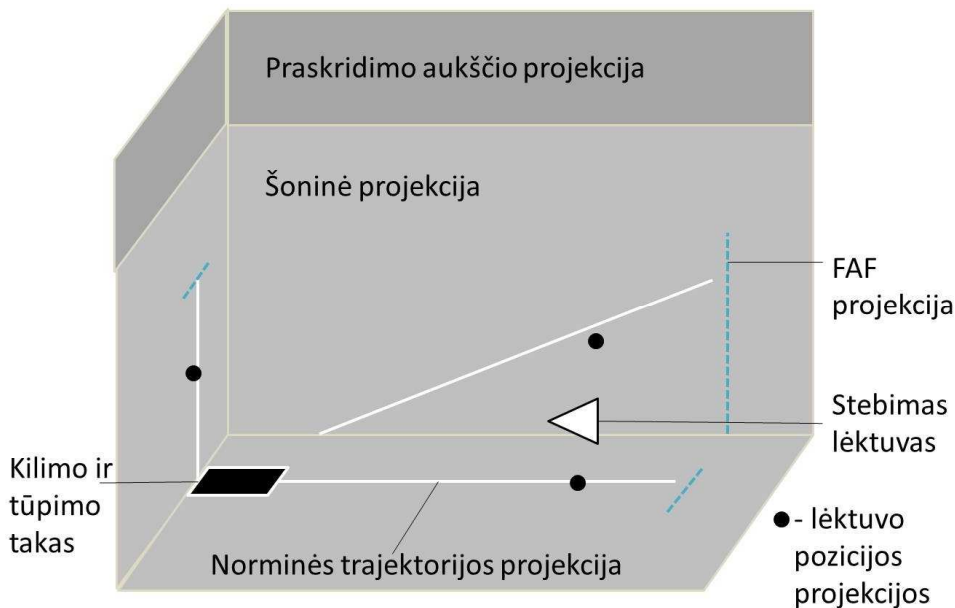
kranto linija ir aukšti objektai (pvz., kalnai). Jų parodymas 3D padeda orientuotis. Norminė trajektorija rodoma linijomis ant projekcijų sienų.



17 pav. Artėjimo tūpti procedūros šoninės projekcijos pavyzdys (VATITA, 2003, schema nr. 352)

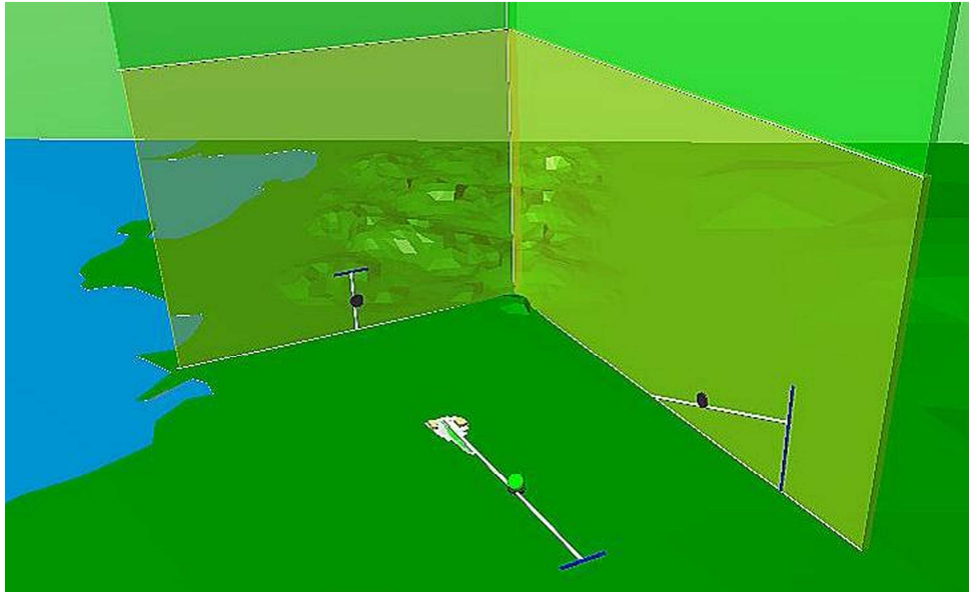
Kitos šio modelio (18 pav.) savybės:

- Rodomas procedūros įėjimo į glisadą taškas (angl. *Final Approach Fix*, FAF).
- Vaizdas pasukamas taip, kad būtų gerai matoma šoninė projekcija, lygiagrečiai kilimo-tūpimo takui.
- Vizualizuojamos tik dabartinės lėktuvo pozicijos projekcijos, o liekamoji trajektorija – ne.



18 pav. „Integruotas 2D/3D“ vizualizavimo modelis

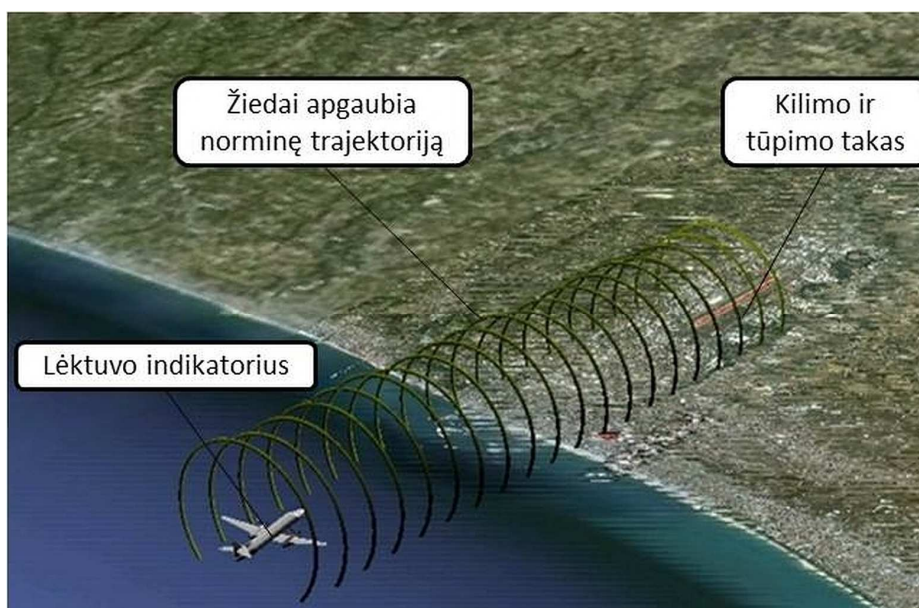
Artėjimo tūpti procedūros pažeidimai gali būti stebimi vizualiai realiu laiku (19 pav.). Jei lėktuvo pozicijos projekcija yra ne ant norminės trajektorijos projekcijos linijos, tai fiksuojamas procedūros pažeidimas. Artėjimo tūpti procedūros norminės trajektorijos projekcijos vaizduojamos baltomis linijomis. Tamsesnėmis linijomis parodytos įėjimo į glisadą taško (FAF) projekcijos. Stebimas lėktuvas vaizduojamas atskiru indikatoriumi, o dabartinės lėktuvo pozicijos projekcijos – juodais indikatoriais.



19 pav. Artėjimo tūpti procedūros pažeidimų stebėjimas „integruotame 2D/3D“ prototipe

4.1.3. „Grynas 3D“ prototipas

Kaip alternatyva „integruotam 2D/3D“ realizuotas „grynas 3D“ vizualizavimo modelis (20 pav.). Vietoje 3D reljefo modelio yra naudojamos didelės raiškos vietovės palydovinės nuotraukos. Toks vaizdas atrodo realistiškesnis, bet žemės paviršiaus nelygumų aukščio informacija vaizduojama tik spalvomis. Kaip lėktuvo indikatorius naudojamas realistiškas lėktuvo 3D modelis. Jo proporcijos padidintos, kad geriau matytųsi. Procedūros norminė trajektorija apgaubta žiedais. Jie prasideda nuo įėjimo į glisadą taško ir baigiasi ant kilimo-tūpimo tako. Žiedų dydis atspindi nustatytą leidžiamą nuokrypį (mažiausią pažeidimo slenkstį). Jei lėktuvo indikatorius atsiranda už žiedų, yra procedūros pažeidimas.



20 pav. „Gryno 3D“ vizualizavimo modelio demonstracija

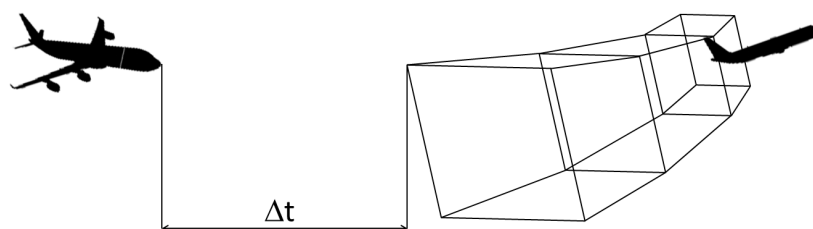
Sprendimų paramos scenarijus yra analogiškas kaip pirmajame prototipe. Lėktuvui priskyrus oro uosto procedūrą, parodomi procedūros žiedai. Jei lėktuvo pozicijos indikatorius yra žiedų viduje, tai procedūros yra laikomasi. Šis vizualizavimas yra mažiau griežtas nei „integruotas 2D/3D“, tačiau jo užtenka greitai įvertinti pažeidimo buvimą/nebuvimą.

4.2. Valkties turbulencijos intervalo pažeidimo modeliavimas

Siekiant pademonstruoti siūlomą pažeidimo modelį, nagrinėjamos valkties turbulencijos vengimo taisyklės. Šiame poskyryje modeliuojama laiku grindžiama valkties turbulencijos vengimo taisyklė (pvz., 120 sekundžių tarp pirmesnio ir iš paskos skrendančio lėktuvo). Laiku grindžiamos taisyklės modeliavimas apima numatymą kaip judės iš paskos skrendantis lėktuvas ir vertinimą, per kiek laiko jis pasieks poziciją, kurioje šiuo metu yra pirmiau skrendantis lėktuvas. Tačiau vertinti pažeidimą remiantis tik trajektorijos numatymu nepakanka: 1) toliau į ateitį numatymai yra mažiau tikslūs, 2) pirmiau skrendantis lėktuvas gali manevruoti. Siekiant į tai atsižvelgti, bus naudojamas valkties turbulencijos srities modelis.

4.2.1. Valkties turbulencijos srities modelis

Jis apibrėžia, kokioje erdvės dalyje (sirtyje) yra tikėtina susidurti su praskridusio lėktuvo palikta turbulencija. Esami modeliai yra sudėtingi, reikalauja daug atmosferinių parametrų, o SPS turi informaciją tik apie lėktuvo poziciją ir greitį. Todėl apibrėžiamas paprastas geometrinis modelis (21 pav.). Šiame modelyje pasitelktos idėjos iš NEXTOR (Shortle et al., 2010) modelio.



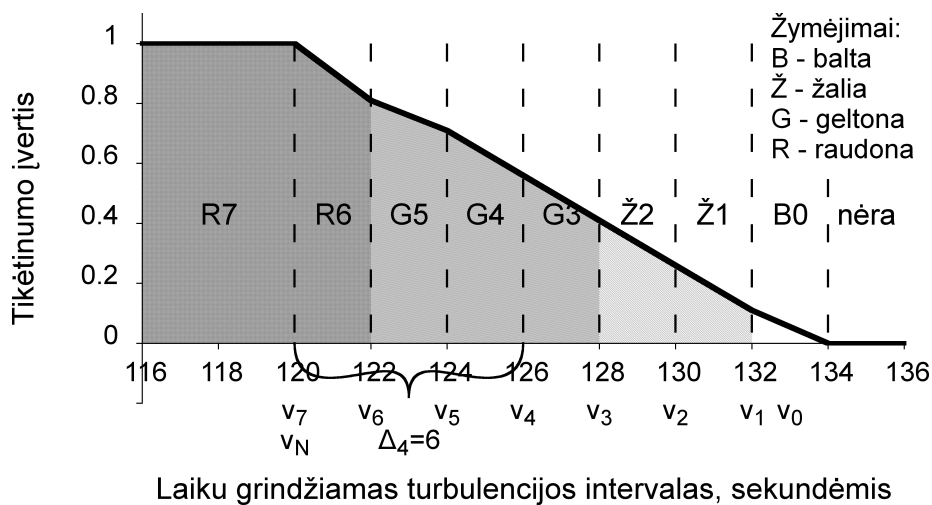
21 pav. Siūlomas valkties turbulencijos srities modelis

Siūlomas fiksuotos srities modelis, sudarytas iš daugiakampių. Daugiakampiai apibrėžti tik pagal pirmiau skrendančio lėktuvo pozicijas laiko intervale, atitinkančiame norminę reikšmę (120 sekundžių). Šis intervalas padalinamas į dalis, ir kiekvienam iš jų apibrėžiamas daugiakampis. Kuo toliau į praeitį, tuo daugiakampiai didesni. Pažeidimo tikėtimumo vertinimas skaičiuoja kiek laiko (Δt) iš paskos skrendančiam lėktuvui prireiks, kad pasiektų erdvę, apibrėžtą daugiakampiais. Tokiu būdu atsižvelgiama į manevrus, kuriuos atliko pirmiau skrendantis lėktuvas, ir naudojamas trumpesnis numatymas (kelios sekundės, o ne kelios dešimtys).

4.2.2. Valkties turbulencijos intervalo pažeidimo apibrėžimas

Apibrėžti devyni lygmenys ($L = 9$): „nėra“, B0, Ž1, Ž2, G3, G4, G5, R6 ir R7. Pažeidimo slenksčius galima išreikšti per nukrypimus nuo norminės reikšmės v_N : $v_0 = v_N + \Delta_0$, $v_1 = v_N + \Delta_1$, ir t. t. Kaip pavyzdį paimkime Δ_4 , kuris yra 6 sekundės (22 pav.). Jei numatoma, kad iš paskos skrendantis lėktuvas pasieks valkties turbulencijos sritį per 6 sekundes ar mažiau (bet ne mažiau kaip per 4 sekundes, nes tai yra Δ_5), tai lygmuo vertinamas kaip G4.

Laiku grindžiamo valkties turbulencijos intervalo pažeidimo apibrėžimas yra toks: 1) faktorius: „laiku grindžiamas valkties turbulencijos intervalas“; 2) predikatas: $\geq v_N$; 3) norminė reikšmė: 120 s; 4) tipas: „apribojimas“; 5) slenksčiai: $v_7 = v_N = 120$ s, $v_6 = 122$ s, $v_5 = 124$ s, $v_4 = 126$ s, $v_3 = 128$ s, $v_2 = 130$ s, $v_1 = 132$ s, $v_0 = 134$ s.



22 pav. Laiku grindžiamo valkties turbulencijos intervalo pažeidimo modeliavimas

4.3. Pelenų debesies zonos pažeidimo modeliavimas

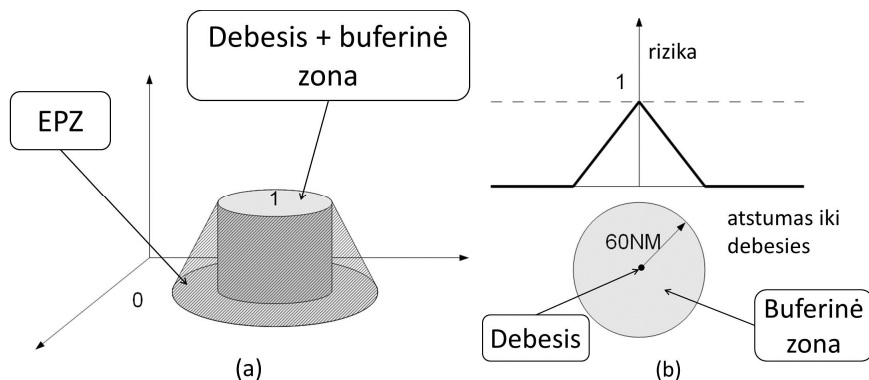
Šiame poskyryje nagrinėjama, kaip pritaikyti siūlomą normų pažeidimo modelį su pelenų debesimis susijusiems pažeidimams modeliuoti. Kol kas yra neaišku, ar lidaras galėtų padėti aptikti pelenų debesis, ir tai yra tolimesnių lidaro techninių galimybių tyrimų objektas. Net jei lidaras galėtų matuoti pelenų dalelių koncentraciją, jis veikia tik 6 jūrmylių atstumu aplink oro uostą, ko neužtektų išankstiniam perspėjimui. Reikalinga papildoma prielaida – kad sprendimų paramos sistema gauna duomenis apie debesis padėtį ir judėjimą (pvz., iš Europos lidarų tinklo). Modeliuojant pelenų debesų zonos pažeidimą SPS buvo priimtoms tam tikros, uždavinį supaprastinančios, prielaidos:

- 1) Debesis (neskraidymo zona) yra sritis, kurioje dalelių koncentracija didesnė negu $4 \times 10^{-3} \text{g/m}^3$. Tai rekomenduojama norma kai kuriose šalyse (UK CAA, 2011). Tokiu būdu skristi (taip pat kilti ir tūpti) pelenų debesyje yra draudžiama.
- 2) Debesis modeliuojamas kartu su 60 jūrmylių buferine zona, kurią reglamentuoja (ICAO Eur Doc 019, 2010).

- 3) Laikoma, kad debesis yra begalinio aukščio, t. y. nagrinėjamos tik horizontalios debesies koordinatės. Vizualizavimo patogumui debesies 3D modelis turės aukštį (h_{cloud}). Šis aukštis turėtų būti pakankamai didelis, kad apimtų stebimų lėktuvų trajektorijas, t. y. $h_{\text{cloud}} \gg h_{\text{transition}}$.
- 4) Debesis apibrėžiamas kaip vienas taškas – realaus debesies centras. Šitaip kartu su buferine zona jis sudaro 60 jūrmylių spindulio cilindą.
- 5) Žinomos debesies pradinės koordinatės. Jas SPS prototipas gauna kaip pradinis duomenis.
- 6) Debesis juda pastoviu žinomu greičiu link oro uosto. SPS prototipas gauna debesies greitį ir judėjimo kryptį kaip pradinis duomenis.

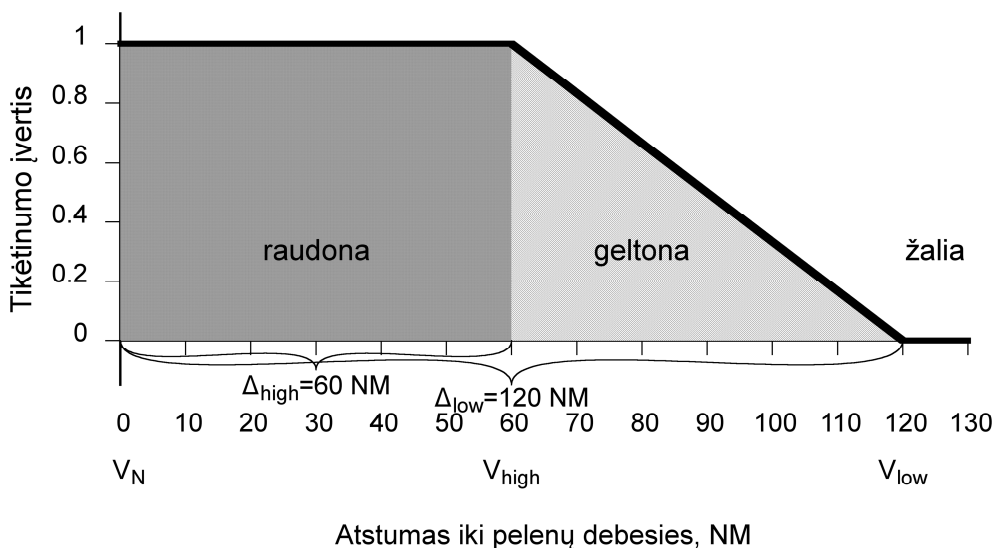
SPS prototipas neturi duomenų apie dalelių koncentraciją, todėl pelenų debesies zonos pažeidimo vertinimas bus paremtas atstumu tarp lėktuvo pozicijos ir debesies pozicijos (žinomo taško, kuriame dalelių koncentracija viršija normą). Pelenų debesies zonos pažeidimą galima modeliuoti keliais būdais:

- Griežtas požiūris. Pažeidimo įvertis yra maksimalus, kai lėktuvo pozicija patenka į neskraidymo zoną (debesis + buferinė zona). Papildoma zona, atitinkanti sustiprintos kontrolės zoną (angl. *enhanced procedure zone*, EPZ) pridedama prie neskraidymo zonos (23 pav., a). EPZ zonoje įvertis mažėja, kai tolstama nuo neskraidymo zonos. Už EPZ zonos įvertis yra minimalus (nulis).
- Mažiau griežtas požiūris. Pagal galiojančias taisykles, buferinė zona nenaudojama. Galima apibrėžti, kad įvertis yra maksimalus tik pačiame debesies taške, ir palaipsniui mažėja tolstant nuo debesies (23 pav., b). Buferinės zonos išorėje įvertis yra minimalus (nulis).



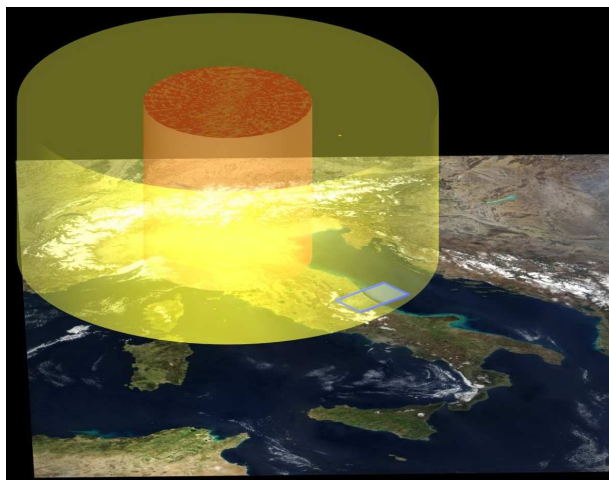
23 pav. Griežtas (a) ir mažiau griežtas (b) pelenų debesies zonos pažeidimo modeliavimas

Pažeidimo apibrėžimui griežto požiūrio atveju nustatomi trys lygmenys (24 pav.): „žalia“, „geltona“ ir „raudona“. Norminė reikšmė laikoma lygi nuliui $v_N=0$: atstumas iki debesies turi būti didesnis negu 0. Pelenų debesies zonos pažeidimo apibrėžimas yra toks: 1) faktorius: „atstumas iki debesies“; 2) predikatas: $\geq v_N$; 3) norminė reikšmė: 0 NM; 4) tipas: „apribojimas“; 5) slenksčiai: $v_{\text{high}} = 60 \text{ NM}$, $v_{\text{low}} = 120 \text{ NM}$.



24 pav. Atstumo iki pelenų debesies pažeidimo modeliavimas

Jei SPS gauna duomenis apie debesies padėtį ir judėjimą, debesis gali būti vizualizuojamas kaip pusiau permatomas cilindras (25 pav.). Šitai leidžia vizualiai įvertinti, kaip arti oro uosto zonos yra debesis.



25 pav. Pelenų debesies vizualizavimo demonstracija

4.4. Prototipo demonstravimas ir validavimas

4.4.1. Prototipo demonstracijos

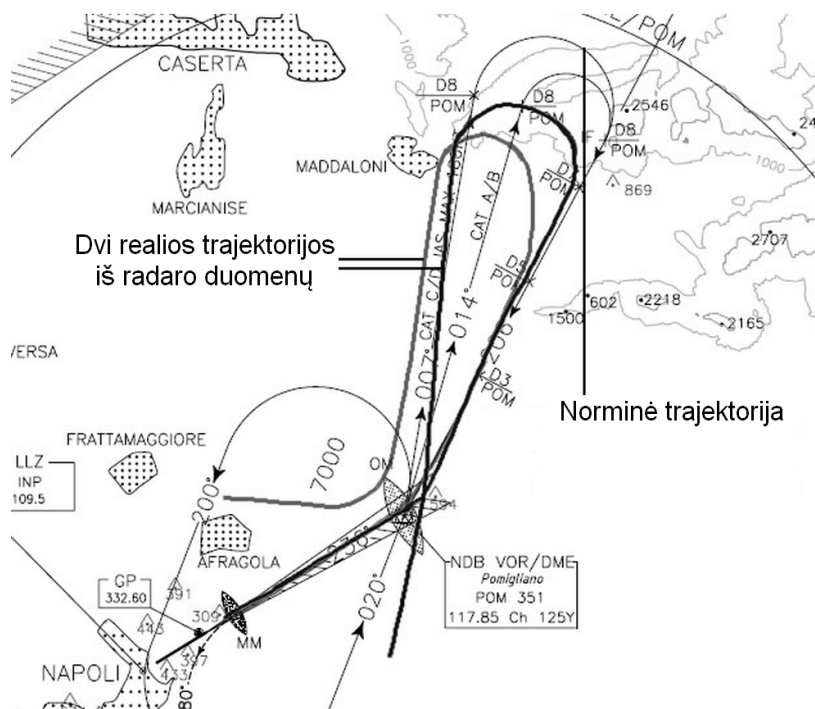
Pasirinktos norminės taisyklės buvo sumodeliuotos ir realizuotos SPS prototipe siekiant pademonstruoti, kaip veikia siūlomas pažeidimo modeliavimo ir vizualizavimo metodas. Pats SPS prototipas taip pat buvo demonstruotas potencialiems naudotojams, siekiant išgirsti jų atsiliepimus ir validuoti idėjas.

„Trajektorijos pažeidimo“ vizualizavimo modeliai buvo pademonstruoti Peskaros oro uosto skrydžių vadovams. „Integruotas 2D/3D“ modelis buvo įvertintas kaip intuityvesnis ir labiau tinkamas sprendimų paramai negu „grynas 3D“ modelis su

žiedais. Apibendrintas reljefo modelis įvertintas kaip mažiau blaškantis dėmesį negu sudarytas iš palydovinių nuotraukų.

SPS prototipas taip pat buvo pademonstruotas skrydžių vadovams trijuose Lietuvos oro uostuose. Oro eismas šiuose oro uostuose nėra intensyvus, ir dauguma skrydžių vadovų pažymėjo, kad papildomos sprendimų paramos priemonės nėra būtinos jų kasdieniame darbe. Vienas iš pastebėjimų buvo, kad siūlomi vizualizavimo modeliai galėtų pakeisti nepatogų tikslaus užėjimo radaro ekraną.

Kaip buvo minėta, SPS prototipas buvo testuojamas su vienos dienos skrydžių radaro archyvu iš Neapolio Kapodičino oro uosto. Šiuose pavyzdiniuose duomenyse nepasitaikė pavojingų situacijų, ir visus skrydžius galima laikyti normaliais. Dėl to slenksčiai SPS prototipe parinkti tokie, kad ir su turimais duomenimis būtų nustatomi pažeidimai. Radaro duomenų analizė rodo, kad kai kurie skrydžiai ženkliai nukrypsta nuo trajektorijos, apibrėžtos artėjimo tūpti procedūroje (26 pav.). Tai rodo, kad papildomi tyrimai reikalingi, norint modeliuoti, kokio dydžio nukrypimai gali būti laikomi normaliais.



26 pav. Nukrypimų nuo Neapolio Kapodičino ILS-V procedūros (VATITA, 2003, schema nr. 353) pavyzdžiai

4.4.2. Suderinamumas su SESAR tyrimais

SESAR programa numato perėjimą prie 4D trajektorijomis grindžiamos oro eismo valdymo (SESAR, 2007, p. 18). 4D trajektorija apibrėžia skrydį kaip seką taškų, kuriems nurodoma horizontali padėtis, aukštis ir laikas, kada lėktuvas turi būti tame taške (Wilson, 2007). Planuojamas perėjimas prie 4D trajektorijų reiškia, kad bus naudojama daugiau smulkių apribojimų lėktuvų trajektorijoms. Šių apribojimų laikymasis bus sudėtingesnis nei esant dabartinėms oro eismo procedūroms. Kai kuriuose skrydžio

etapuose bus reikalingas didesnis piloto ir skrydžių vadovo veiksmų koordinavimas (Zeghal & Dowling, 2008). Skrydžių vadovui bus reikalingi sprendimų paramos įrankiai, kurie padėtų patikrinti, ar lėktuvas laikosi visų apribojimų.

Siūlomas normos pažeidimo modelis yra suderinamas su 4D trajektorijos modeliu. 4D trajektorijos apribojimus galima išreikšti kaip keturis faktorius: tris koordinates ir laiką. Laikas 4D trajektorijos apibrėžime yra absoliutus, t. y. nurodomas tikslus momentas, kada lėktuvas turi būti nurodytame taške. SPS prototipas šiuo metu operuoja tik santykinu laiku – per kiek laiko nuskrendama nuo įėjimo į glisadą taško iki kilimo-tūpimo tako, ar per kiek laiko iš paskos skrendantis lėktuvas pasivytų pirmiau skrendantį lėktuvą. Jei SPS sumodeliuoti absoliutų laiką, būtų galima išreikšti 4D trajektorijas kaip pažeidimų apibrėžimus ir tikrinti trajektorijos atitikimą.

4.5. Išvados

Pasirinktos lėktuvo kilimo/tūpimo taisyklės buvo realizuotos SPS prototipe: artėjimo tūpti procedūrų apribojimai (aukštis, horizontali pozicija ir nusileidimo kampas), valkties turbulencijos ir pelenų debesų vengimas. Pasiūlyti du „nukrypimo nuo trajektorijos“ (artėjimo tūpti procedūros pažeidimo) vizualizavimo modeliai: „integruotas 2D/3D“ ir „grynas 3D“. Jie skiriasi tuo, kaip vizualizuojami procedūros apribojimai. Šiuose vizualizavimo modeliuose pasitelktos technologinio pasirengimo lygių 1 ir 2 (Mankins, 1995) idėjos iš kitų projektų. Realizacija SPS prototipe jas pakelia į 3 lygį, t. y. pritaiko konkrečiau uždavinio kontekstui.

Išvados

1. Sumodeliuoti ir vizualizuoti norminės taisyklės pažeidimą pasirinktoje dalykinėje srityje – sprendimų paramoje lėktuvo kilimo/tūpimo fazėse – yra įmanoma. Pažeidimo modelis paremtas prielaida, kad iš radiolokacijos įrenginių yra gaunama tiksli lėktuvo pozicija. Pasiūlytas modelis sujungia keletą paprastų modelių: atkarpomis tiesinį įvertį ir „šviesoforo“ modelį.
2. Pasiūlytas metodas tinka modeliuoti atrinktas lėktuvo kilimo/tūpimo normines taisykles sprendimų paramos sistemoje (SPS), skirtoje skrydžių vadovui. Šios taisyklės įvardinamos kaip „geometrinės normos“.
3. Pasiūlytą metodą įmanoma realizuoti kompiuteriu – sukurtas SPS prototipas. Jis pateikia siūlomo sprendimų paramos proceso realaus laiko imitavimą. Jame sumodeliuoti šie faktoriai: horizontalus ir vertikalus intervalas tarp lėktuvų, aukštis nurodytu atstumu iki oro uosto, greitis oro atžvilgiu, glisada bei laiku grindžiamas valkties turbulencijos intervalas.
4. Pasiūlyti du „trajektorijos pažeidimo“ vizualizavimo modeliai: 1) „integruotas 2D/3D“ ir 2) „grynas 3D“. Jie skiriasi tuo, kaip vizualizuojamas lėktuvo pozicijos ir procedūroje reglamentuotos trajektorijos atitikimas (2D projekcijų sienose arba žiedais pagrindiniame 3D lange).
5. Normos pažeidimo modeliavimas gali būti automatizuotas faktoriams, kurie buvo pademonstruoti SPS prototipe. Kitiems faktoriams reikalinga papildoma analizė.

Publikacijos disertacijos tema

Publikacijos periodiniuose leidiniuose

Lapin, K., Čyras, V. & Savičienė, L. (2012). The SKY-Scanner Time-Critical Decision Support System for Surveillance and Risk Evaluation During Landing and Take-off. (L. Castelli & D. Schaefer, Eds.) *Journal of Aerospace Operations*, 1(3), 301–314. ISSN 2211-002X.

Savičienė, L. (2011). Operationalization of Norms in the SKY-Scanner Decision Support System for Aircraft Approach and Departure. *Informacijos mokslai*, 56, 128–137. ISSN 1392-0561.

Savičienė, L. (2009). Žmogaus ir kompiuterio sąsajos projektavimas skrydžių valdymo sprendimų priėmimo sistemai. *Informacijos mokslai*, 50, 181–186. ISSN 1392-0561.

Knygos skyrius

Lapin, K., Čyras, V. & Savičienė, L. (2011). Visualization of Aircraft Approach and Departure Procedures in a Decision Support System for Controllers. (J. Barzdins & M. Kirikova, Eds.), *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, Vol 224. *Databases and Information Systems VI*, 408–421. Amsterdam: IOS Press. ISBN 978-1-60750-687-4.

Publikacijos recenzuojamuose konferencijų leidiniuose

Savičienė, L. (2011). Operationalization of Regulations for Aircraft Approach and Departure. In E. Garcia et al. (Eds.), *Proceedings of the 1st International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems, ATACCS'2011* (pp. 68–72). Barcelona, Spain: IRIT Press.

Savičienė, L. (2010). Modeling Path Violation in a Decision Support System for Aircraft Approach and Departure. In A. Targamadze, R. Butleris & R. Butkiene (Eds.), *Information Technologies'2010: Proceedings of the 16th International Conference on Information and Software Technologies, IT 2010* (pp. 80–87). Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology.

Savičienė, L. (2012). Modeling Operationalization of Normative Rules in Decision Support for Aircraft Approach/Departure. In *Databases and Information Systems: Post-Proceedings of the 10th International Conference Baltic DB&IS 2012* (priimtas spausdinti).

Apie autoreę

Laura Savičienė 2003 m. baigė Vilniaus universiteto Matematikos ir informatikos fakultetą ir įgijo informatikos bakalauro laipsnį (BSc). 2005 m. įgijo informatikos magistro laipsnį su pagyrimu (MSc, Cum laude) Vilniaus universitete. Nuo 2008 iki 2012 m. – Vilniaus universiteto informatikos doktorantė.

L. Savičienė nuo 2005 m. dirba Vilniaus universitete. Iki 2008 metų ji dirbo asistente, o nuo 2008 m. – lektore, dėsto informatiką (programavimą) ir vadovauja studentų diplominiams darbams. Nuo 2004 metų autorė dirba proceso kokybės vadybininke informacinių technologijų įmonėje.

2009 metais L. Savičienė dalyvavo doktorantų mokykloje Šiaurės Airijoje.

Summary

This dissertation is focused on a method to model and visualize normative rule violation in decision support for aircraft approach/departure. A prototype system is developed with a purpose to demonstrate feasibility of the proposed method. Normative rules are taken from the flight rules, maps, approach/departure procedure charts and other legal documents. An example of a normative rule is “Keep 3 degrees descent angle while landing and hold restrictions of the altitude and geography which is depicted in the aerodrome chart”. The research is limited to norms which are applicable in the approach/departure phases of flight. The work is based on the assumption that lidar, which is used together with the radar, provides aircraft position with a high degree of accuracy. This enables the decision support system to detect trajectory violations.

A method for norm violation modeling and visualization of normative behavior in the decision support system is proposed. Normative rules for aircraft approach/departure are represented as risk item definitions in the decision support system (DSS). Two norm types are identified: limit-based and deviation-based. Each norm is modeled with a factor (attribute of the trajectory, or several trajectories), a normative value, and a predicate. A formalization of the violation is proposed. The risk model incorporates a piecewise linear risk function and the traffic-light model. Risk item definition associates a modeled norm with a set of thresholds and discrete risk levels. Risk evaluation maps the observed value to a discrete risk level. Each risk level is mapped to one of traffic light colors (green-yellow-red), to help guide the air traffic controller decisions. Risk is visualized (presented for visual cognition) with a colored indicator on the DSS control panel. Innovative visualization ideas from other projects were adapted for the lidar-based DSS. Hereby, two methods based on 3D views were proposed to visualize the adherence of the aircraft to the airport procedures. Additional objects (projection curtains, wireframe rings) which are integrated into the main 3D window allow the user to visually estimate compliance with the procedure.

Literatūra

Azuma, R., Daily, M. & Furmanski, C. (2006). Review of Time Critical Decision Making Models and Human Cognitive Processes. *Proceedings of the 2006 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1–9). Big Sky, Montana, USA: IEEE.

Azuma, R., Daily, M. & Krozel, J. (1996). Advanced Human-Computer Interfaces For Air Traffic Management And Simulation. *AIAA Flight Simulation Technologies Conference* (pp. 656–666). San Diego, USA: AIAA.

Bourgois, M., Cooper, M., Duong, V., Hjalmarsson, J., Lange, M. & Ynnerman, A. (2005). Interactive and Immersive 3D Visualization for ATC. *6th USA-Europe ATM R&D Seminar* (pp. 303–309). Baltimore, USA: Eurocontrol with FAA.

Boyle, I. (1999). Traffic Light Decision Making. *Australian Journal of Outdoor Education*, 3(2), 1–9.

Chaloulos, G., Lygeros, J., Roussos, G. & Kyriakopoulos, K. (2009). Mid and Short Term Conflict Resolution in Autonomous Aircraft Operations. *8th Innovative Research Workshop & Exhibition*. Brétigny-sur-Orge, France: Eurocontrol.

Chamlou, R. (2009). Future Airborne Collision Avoidance – Design Principles, Analysis Plan and Algorithm Development. *IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference* (pp. 6.E.2-1–6.E.2-17). Orlando, USA: IEEE.

Čyras, V., Dapkūnas, S., Lapin, K., Plankis, T. & Savičienė, L. (2009). *Aircraft Collision Probability and Decision Support Model Development and New Generation ATM Paradigm Specification; Deliverable D13* (confidential). EU FP6 SKY-Scanner project, TREN-4-Aero, 037161, 2007–2010.

Čyras, V., Lapin, K. & Savičienė, L. (2011). *DSS Additional Module – Wake Vortex Separation and Volcanic Ashes Characterization; Deliverable D25* (confidential). EU FP6 SKY-Scanner project “Development of an Innovative LIDAR Technology for New Generation ATM Paradigms”, thematic priority 1.4 Aeronautics and Space, TREN-4-Aero, 037161, 2007–2010.

Gandomi, A. & Jandaghi, G. (2012). Change-Point Models in Risk. *American Journal of Scientific Research*, 57, 107–112.

ICAO Doc 4444. (2007). *Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management* (Fifteenth ed.). Montréal, Canada: ICAO.

ICAO Doc 8168. (2006). *Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations* (Fifth ed., Vol. 1). Montréal, Canada: ICAO.

ICAO Doc 9691. (2007). *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds* (Second ed.). Montréal, Canada: ICAO.

ICAO Doc 9863. (2006). *Airborne Collision Avoidance System (ACAS) Manual* (First ed.). Montréal, Canada: ICAO.

ICAO Annex 4. (2009). *Aeronautical Charts. Annex 4 to the Convention on International Civil Aviation* (Eleventh ed.). Montréal, Canada: ICAO.

- ICAO Eur Doc 019. (2010). *Volcanic Ash Contingency Plan – EUR and NAT Regions* (Second ed.). Retrieved October 17, 2012, from International Civil Aviation Organization European and North Atlantic (EUR/NAT) Office: <http://www.paris.icao.int/news/pdf/EUR%20Doc%20019-NAT%20Doc%20006%20Part%20II%20%28December%202010%29.pdf>
- ISO Guide 73. (2009). *ISO Guide 73:2009 Risk Management, Vocabulary*. International Standardization Organization.
- Kraak, M. J. (2003). The Space-Time Cube Revisited from a Geovisualization Perspective. *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference: Cartographic Renaissance* (pp. 1988–1996). Durban, South Africa: International Cartographic Association.
- Kuchar, J. K. (2001). Managing Uncertainty in Decision-Aiding and Alerting System Design. *Proceedings of the 6th CNS/ATM Conference*, (pp. 1–10). Taipei, Taiwan.
- Kuchar, J. K. & Yang, L. C. (2000, December). A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1(4), 179–189.
- Lange, M., Hjalmarsson, J., Cooper, M. & Ynnerman, A. (2003). 3D Visualization and 3D and Voice Interaction in Air Traffic Management. In M. Ollilia (Ed.), *The Annual SIGRAD Conference* (pp. 17–22). Umea, Sweden: Linköping University Electronic Press.
- Lee, H. C. (2006). Implementation of Collision Avoidance System Using TCAS II to UAVs. *IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine*, 21(7), 8–13.
- Mahler, T. (2009). *Legal Risk Management. Developing and Evaluating Methods for Proactive Legal Analyses, with a Particular Focus on Contracts*. Doctoral dissertation. University of Oslo. Oslo: University of Oslo.
- Mankins, J. C. (1995). *Technology Readiness Levels*. Report. NASA, Office of Space Access and Technology, Advanced Concepts Office.
- Pascual, R. & Henderson, S. (1997). Evidence of Naturalistic Decision Making in Military Command and Control. In C. E. Zsombok & G. Klein (Eds.), *Naturalistic Decision Making* (pp. 217–226). Mahwah, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Renn, O. & Graham, P. (2005). Risk Governance. Towards an Integrative Approach. White paper. Geneva, Switzerland: International Risk Governance Council.
- Rozzi, S., Boccalatte, A., Amaldi, P., Fields, B., Loomes, M. & Wong, W. (2007). *Innovation and Consolidation Report*. Interaction Design Centre. London, UK: Middlesex University.
- Salerno, M., Rondinella, D., Crispino, M. V., Costantini, G., Carota, M. & Casali, D. (2008). SKY-Scanner: a New Paradigm for Air Traffic Management. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2(2), 131–139.
- Šarkutė, L. (2009). Sprendimų priėmimo samprata ir tyrimų tradicijos. *Sociologija, Mintis ir veiksmai*, 2(25), 105–119.
- SESAR. (2007). *The ATM Target Concept*. Deliverable document. Toulouse, France: SESAR Consortium.

Shortle, J., Sherry, L., Wang, J., Zhang, Y., Swol, D. C. & Trani, A. (2010). Wake Turbulence Modeling. *NEXTOR Research Symposium* (p. 31). Washington: The National Center of Excellence for Aviation Operations Research.

Sternberg, R. J. (1977). Component Processes in Analogical Reasoning. *Psychological Review*, 84(4), 353–378.

UK CAA. (2011). *Guidance Regarding Flight Operations in the Vicinity of Volcanic Ash*. Retrieved October 17, 2012, from UK Civil Aviation Authority:
<http://www.caa.co.uk/docs/1425/20110526GuidanceRegardingFlightOperationsInTheVicinityOfVolcanicAsh.pdf>

VATITA. (2003). *Instrument Approach Chart schemas nr. 349, 351, 352*. Retrieved May 18, 2009, from Flight Planning – Italian Airport Charts and Sceneries:
<http://www.vatita.net/?dir=ajaxcharts&pagina=charts>

Williams, E. (2004). Airborne Collision Avoidance System. *Proceedings of the 9th Australian Workshop on Safety Critical Systems and Software* (pp. 97–110). Brisbane, Australia: Australian Computer Society.

Wilson, I. A. (2007). 4-Dimensional Trajectories and Automation Connotations and Lessons Learned from Past Research. *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, 2007. ICNS'07* (pp. 1–10). Herndon, USA: IEEE.

Wong, W., Rozzi, S., Boccalatte, A., Gaukrodger, S., Amaldi, P., Fields, B., Loomes, M. & Martin, P. (2007). 3D-in-2D Displays for ATC. *6th Innovative Research Workshop* (pp. 42–62). Brétigny-sur-Orge, France: Eurocontrol.

Zeghal, K. & Dowling, F. (2008). *4D Trajectory Management: an Initial Pilot Perspective*. (Eurocontrol) Retrieved June 11, 2012, from Eurocontrol Experimental Centre:
http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/EEC_News_2008_2_TM.html