

Fremgangsmåte og system for dynamisk posisjonering av instrumentert tauet kabel i vann

Den foreliggende oppfinnelsen gjelder en fremgangsmåte for dynamisk posisjonering av instrumentert tauet kabel i vann, i samsvar med innledningen til patentkrav 1.

5 Den foreliggende oppfinnelsen gjelder også et system for dynamisk posisjonering av instrumentert tauet kabel i vann, i samsvar med innledningen til patentkrav 7.

Spesielt gjelder den foreliggende oppfinnelsen en fremgangsmåte og et system for absolutt og relativ dynamisk posisjonering (DP) av marine instrumenterte kabler tauet i parallell.

10 Bakgrunn

En seismisk instrumentert kabel (streamer) er en langstrakt kabelliknende struktur (ofte opptil flere tusen meter lang), som omfatter et array av hydrofonkabler og assosiert med elektrisk utstyr langs dens lengde, og som brukes i marin seismisk kartlegging. For å utføre en 3D/4D seismisk kartlegging trekkes et flertall slike instrumenterte kabler bak et kartleggingsfartøy. Akustiske
15 signaler produseres ved at de seismiske kildene er rettet ned gjennom vannet og inn i havbunnen under, hvor de reflekteres av de ulike lagene. De reflekterte signalene mottas av hydrofonkabler og blir så digitalisert og behandlet for å danne en representasjon av lagene i området som kartlegges.

De instrumenterte kablene er typisk trukket med en konstant dybde på omtrent fem-ti meter, for å fremme fjerning av uønskede "falske" refleksjoner fra overflaten av vannet. For å holde de
20 instrumenterte kablene ved en konstant dybde, er styringsinnretninger kjent som "bird" festet til hver instrumentert kabel med intervaller på 200 til 300 meter.

Små variasjoner i dybde og sideveis bevegelse er uunngåelig. Hovedårsaken til variasjoner i dybden er lange periodiske bølger og endringer i salinitet og dermed oppdrift langs kabelen.

25 Generelt er den mest kritiske situasjonen når det trekkes i den samme retningen som dønningene. Sideveis bevegelse av instrumenterte kabler er hovedsakelig forårsaket av havstrømningskomponenter vinkelrett på trekkretningen. Relativt store avvik kan også forekomme i områder med brakkvann der elveløp med ferskvann flyter ut i sjøen noe som kan gi lagdeling av vannmasser med forskjellig tetthet. I tilfeller med både dønninger og sidestrømspåvirkning er det
30 økt fare for at de instrumenterte kablene vikler seg inn i hverandre.

Kabelstrekket avtar proporsjonalt med avstanden fra trekkpunktet. Derfor vil små variasjoner i sideveis bevegelse og vertikal bevegelse tendere til å ha større amplituder nær halen av de instrumenterte kablene. Imidlertid vil ikke kreftene som virker vinkelrett på den instrumenterte kabelen fordeles uniformt over kabelens lengde og de vil endres over tid ettersom det trukne
35 arrayet bevegese fremover.

Under en seismisk kartlegging er de instrumenterte kablene tiltenkt å opprettholdes i en rett linje, parallell til hverandre, likt adskilt og på samme dybde. Imidlertid, etter utsetting av de instrumenterte kablene, må vanligvis fartøyet kjøre i en rett linje i minst tre kabellengder før kabelfordelingen er tilstrekkelig nært det ideelle oppsettet og kartlegging kan starte. Dette øker tiden det tar å utføre en kartlegging og derfor økes kostnadene ved kartleggingen. Imidlertid, pga. havstrømninger feiler de instrumenterte kablene i akkurat å følge banen til det seismiske kartleggingsfartøyet og noen ganger avviker fra denne banen med en vinkel, kjent som "feathering angle". Dette kan negativt påvirke dekningen av kartleggingen, hvilket ofte krever at deler av kartleggingen må repeteres. Ved veldig uheldige omstendigheter kan de instrumenterte kablene vikles inn i hverandre, spesielt ved enden av de instrumenterte kablene, som kan medføre betydelig skade og betydelig finansielt tap.

US 5 790 472 (Workman and Chambers) beskriver et lukket sløyfe system for styring av lateral posisjon av seismiske kabler relativt sine respektive nabokabler. Metoden baserer seg på målte posisjoner langs kablene. Dersom to kabler kommer for tett inntil hverandre kommanderes styringsinnretning langs kablene til å sette opp lateral kraft slik at avstanden mellom kablene økes igjen. Dette er i litteraturen kjent som en bang-bang reguleringsstrategi.

US 6 691 038 (Zajac) beskriver et lukket sløyfe system for styring av lateral posisjon av seismiske kabler enten relativt sine respektive nabokabler eller mer generelt i forhold til en spesifisert referanse geometri for hele kabel-spreadet. Kontrolleren benytter kontinuerlig målinger av kablens posisjoner langs hele lengden og beregner ønsket lateral kraft for hver styringsinnretning på kablene. I tillegg til posisjonsmålinger benyttes en egen prosess for prediksjon av kabel-spreadets oppførsel basert på data fra omgivelser og slepefarkostens dynamikk. Prediksjonene benyttes til å beregne en optimal referansekurve for det totale kabel-spreadet. Dette er en høynivå guiding-funksjonalitet som ikke må forveksles med adaptiv sanntidsregulering.

NO 332563 (Rinnan m.fl.) beskriver et lukket sløyfe system for styring av lateral posisjon av seismiske kabler hvor styringsinnretningenes vinger er forsynt med akustisk mottaker- og sender-elementer for måling av avstand/posisjon relativt styringsinnretninger på nabo-kablene. Styring av lateral posisjon kan dermed foregå enten lokalt på styringsinnretningene eller globalt på slepefarkosten basert på en telemetrisk modell av styringsinnretningenes posisjoner det seismiske array'et. I styringsinnretningene sørger en robust regulator for minimal kobling mellom de ulike reguleringsløyvene for hhv. lateral og vertikal kraft og rullmoment. Dermed oppnås både økt stabilitet av styringsinnretningene samt robusthet i forhold til feilsituasjoner der enkeltvinger slutter å virke.

US 2006285434 A1 (Welker m.fl.) beskriver anordninger og fremgangsmåter for styring av seismiske hydrofoner ved at den seismiske hydrofonen har et orienteringsorgan omfattende et

legeme og minst én styringsoverflate; en sensor hos legemet er tilpasset til å måle en parameter som indikerer angrepsvinkel til legemet; og en kontroller for justering av styringsoverflaten basert på den minst målte parameteren.

5 US 2010118645 A1 (Welker) beskriver en fremgangsmåte og en anordning for styring av styringsinnretninger for streamere for å opprettholde streamer-form som gir dekning for en streamer-skyteplan. Teknikken benytter beregnede posisjoner og et streamerform-mål identifisert i skyteplanen for å bestemme styringsinstrukser til styringsinnretningene langs streameren.

10 US 2009310439 A1 et computerlesbart programlagringsmedium for bestemmelse av spredningssettelements avvik fra en planlagt krummet bane i løpet av en marin slepesett-seismikkundersøkelse, samt en fremgangsmåte som omfatter bestemmelse av en nominell posisjon for spredningssettelementer på et gitt punkt i en planlagt krummet bane, bestemmelse av den virkelige posisjonen for spredningssettelementet, og gjennomføring av en feilanalyse predikert på de nominelle og virkelige posisjonene.

15 Et problem med de ovenstående oppfinnelsene er at de enten ikke benytter en prediksjonsmodell som basis for å justere kraftpådraget til styringsinnretningene, eller at prediksjonsmodellen som benyttes ikke oppdateres som funksjon av varierende operasjonelle forhold eller eksterne forstyrrelser. Dermed blir ikke styringssystemet optimalt med hensyn til responstid, og lite robust i forhold til uventede hendelser som forandrer totalsystemets dynamikk.

20 **Formål**

Hovedformålet med den foreliggende oppfinnelsen er å tilveiebringe en fremgangsmåte og et system som helt eller delvis reduserer de ovenfor nevnte ulempene ved kjent teknikk.

25 Videre er det et formål med den foreliggende oppfinnelsen å etablere en fremgangsmåte og et system som gir en hurtigere posisjonsrespons ved styring av et marint instrumentert kabelspread ved varierende forstyrrelser fra omgivelsene.

Et formål med den foreliggende oppfinnelsen er å etablere en fremgangsmåte og et system som gir en mer stabil og robust posisjonsstyring ved at prediksjonsfeil benyttes til å justere kraftpådraget fra styringsinnretningene langs de seismiske kablene.

30 Et annet formål med den foreliggende oppfinnelsen er å etablere en fremgangsmåte og et system som kan bidra til å undertrykke negative innvirkninger på posisjoneringen fra umodellert dynamikk og usikkerhet i modellparametere.

Det er også et formål med den foreliggende oppfinnelsen å etablere en fremgangsmåte og et system for bedre kartlegging av grunnen under sjøbunnen ved marine seismiske operasjoner.

35 Ytterligere formål vil fremgå ved betraktning av den etterfølgende beskrivelsen og patentkravene.

Oppfinnelsen

En fremgangsmåte for å oppnå de ovenfor nevnte formålene i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen er angitt i patentkrav 1. Fordelaktige trekk ved fremgangsmåten er angitt i patentkravene 2-6.

- 5 Et system for å oppnå de ovenfor nevnte formålene i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen er angitt i patentkrav 7. Fordelaktige trekk ved fremgangsmåten er angitt i patentkravene 8-11.

10 Et system for posisjonering av en instrumentert tauet kabel i vann, så som en marin seismisk streamer, og/eller et instrumentert tauet kabel-array (streamer-array) omfatter typisk flere styringsinnretninger anordnet til instrumenterte kabler, en styringssentral anordnet ombord på et fartøy, fortrinnsvis et kartleggingsfartøy, hvilken styringssentral er innrettet for kommunikasjon med de instrumenterte kablene og de enkelte styringsinnretningene anordnet dertil. Dette er ofte referert til som et STAP-system (STAP – "Seismic Towed Array Positioning"). Videre omfatter 15 kjente systemer vanligvis halebøyer anordnet til de instrumenterte kablene i kabel-arrayet, samt deflektoranordninger (dører) for å spre de instrumenterte kablene i et kabel-array. Styrings-sentralen er innrettet for kommunikasjon med styringsinnretninger og halebøyer, enten via den instrumenterte kablen eller trådløst, samt innrettet for kommunikasjon med fartøyet og eventuelt deflektoranordninger. Halebøyer kan erstattes av styringsinnretninger dersom de er 20 forsynt med en GNSS-enhet (GNSS - Globalt Navigasjon Satellitt System).

Styringsinnretningene anordnet til de instrumenterte kablene er fordelaktig en styringsinnretning som omfatter:

- en hovedkropp forsynt med en prosessorenhet, akselerometre, eventuelt rategyro og magnetkompass, trykksensor, samt induktive koblinger for trådløs (kontaktløs) kommunikasjon og energi- 25 overføring til vinger eller mekaniske koblinger for kommunikasjon og energioverføring,
- avtakbare vinger, fortrinnsvis minst to avtakbare vinger, hvilke vinger er forsynt med en prosessorenhet, induktive kobling eller mekanisk kobling for tilkobling til hovedkroppen, halleffektsensor, oppladbare batterier, intelligent ladeelektronikk, motor med momentsensor,
- lokal styringsinnretningssoftware som kjører på kroppens prosessorenhet,
- 30 - lokal vingestyrtingssoftware som kjører på vingens prosessorenhet,
- sensorer for ulike formål som for eksempel dybde, temperatur, salinitet, magnetfelt og bevegelse, samt eventuelt akustiske sendere og mottakere montert i vingen.

Styringsinnretninger som dette er f.eks. beskrevet i søkers norske patenter NO 328856, NO 329190 og NO 332115.

Vingene som nevnt over kan i tillegg til angitte sensorer være utstyrt med sensorer for akustisk undervannstransmisjon, magnetometer, trykksensorer, GNSS-antenne og mottaker, kamera med lyskilde, samt andre sensorer for kartlegging av sjøens og sjøbunnens karakteristiske egenskaper.

Den foreliggende oppfinnelsen utbedrer kjent teknikk gjennom en fremgangsmåte og et system som tilveiebringer absolutt og relativ dynamisk posisjonering (DP) av marine instrumenterte kabler tauet i parallell. I tillegg åpner den foreliggende oppfinnelsen for forbedret sporstyring og/eller autopilot i forbindelse med posisjonering av instrumenterte kabler. Fremgangsmåten og systemet er basert på en ny modellprediktiv adaptiv regulator for styringsinnretninger montert langs de instrumenterte kablene.

10 Fremgangsmåten og systemet omfatter videre bruk av en nominell regulator for hver styringsinnretning som styrer den marine instrumenterte kabelen basert på forkunnskaper om egenskapene til totalsystemet bestående av farkost/fartøy med fremdriftsmidler/styringsmidler, så som thrustere, propeller osv., instrumenterte kabler og styringsinnretninger. Med forkunnskaper menes en dynamisk modell av systemets enkeltkomponenter, samt interaksjonen mellom dem. Den adaptive regulatoren for hver styringsinnretning er innrettet for å kompensere 15 kraftpådraget fra den nominelle regulatoren med den hensikt å motvirke effektene av umodellert dynamikk, usikkerhet i modellparametre, samt varierende eksterne forstyrrelser fra f.eks. vær (vind, strøm, bølger, is) og operasjonelt utstyr.

Fremgangsmåten og systemet i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen omfatter videre en bevegelsesprediktor innrettet for in-situ simulering og prediktering av totalsystemets bevegelse 20 gjennom bruk av en dynamisk prediksjonsmodell av totalsystemet, samt kunnskap om kraftpådrag fra fremdriftsmidlene/styringsmidlene til det tauende fartøyet og muligens også det operasjonelle utstyret. Prediksjonsmodellen representerer dynamikken til det totale systemet bestående av tauende fartøy/farkost med fremdriftsmidler/styringsmidler, instrumenterte kabler og styringsinnretninger og oppdateres kontinuerlig. Avviket mellom prediktert bevegelsesestimat og bevegelsesmålingene benyttes både til å justere kraftpådraget fra styringsinnretningene langs de instrumenterte kablene, samt til å oppdatere prediksjonsmodellen. Bevegelsesmålinger kan 25 omfatte relativ posisjonsmåling mellom noder basert på akustikk, absolutt posisjons-/hastighetsmåling av noder basert på GNSS, samt måling av vinkelhastigheter og orientering for noder basert på treghetssensorer og magnetometer. Med noder menes alle komponenter i systemet som benyttes ved avstandsmålinger og relativ og absolutt posisjonering, eksempelvis slepefarkost, styringsinnretninger, halebøyer, samt eventuelt sensorer for dette innrettet i de instrumenterte kablene, på deflektoranordninger eller på plattformer for seismiske kilder ("gun-array"). 30

Den foreliggende oppfinnelsen skiller seg fra kjent teknikk ved benyttelsen av en adaptiv regulator for styringsinnretningene for å motvirke effektene av umodellert dynamikk, usikkerhet i 35

modellparametre, samt varierende eksterne forstyrrelser. Videre beregnes det justert pådraget for styringsinnretningene basert på prediksjonsfeil i stedet for avvik mellom måling og referanse slik en tradisjonell adaptiv regulator virker. Dermed oppnås en raskere respons når forstyrrelser fra omgivelsene endrer seg, samtidig som en unngår sprang i pådragsorganene ved plutselig endring av posisjonsreferansen for de instrumenterte kablene. Kontinuerlig oppdatering av prediksjonsmodellen sørger for at denne til enhver tid best mulig gjenspeiler totalsystemets dynamikk.

Fremgangsmåten er med andre ord basert på en adaptiv algoritme kalt modellprediktiv adaptiv regulering ("model predictive adaptive control, MPAC").

Hovedmotivasjonen for utviklingen av den foreliggende oppfinnelsen har vært å finne en erstatning for integralvirkningen i PID-regulatorer som ofte brukes til å beregne lateral og/eller vertikal kraft i styringsinnretninger som beskrevet ovenfor for at styringsinnretningen og den instrumenterte kabelen skal oppnå ønskede posisjonsreferanser. Denne integralvirkningen har betydelige begrensninger i ytelse fordi den drives av reguleringsfeilen, det vil si forskjellen mellom et referansesignal og systemets virkelige oppførsel.

Reguleringsfeilen består av to hovedkomponenter: 1) en stasjonær komponent som tilsvarer feilen i stasjonær tilstand og 2) en transient komponent som tilsvarer feilen som oppstår ved endringer i referansesignalet. Ideelt sett er det ønskelig å kun integrere på den stasjonære komponenten av reguleringsfeilen fordi det er den som forteller noe om ukjente effekter som påvirker systemet. Integrasjon av transientkomponenten er ikke ønskelig fordi det kan føre til overskyting eller ustabilitet, noe som er et betydelig problem med PID-regulering. Imidlertid er det ikke mulig å separere stasjonærkomponenten fra transientkomponenten når begge komponentene er tilstede. Derfor vil en mulig løsning være å utsette integrasjonen frem til stasjonærtilstanden har inntruffet, men dette krever en pålitelig stasjonærtilstand-detektor, og vil også forhindre at regulatoren allerede i transientfasen kan lære om de ukjente effektene som påvirker systemet.

For en modellbasert regulator vil den stasjonære reguleringsfeilen samsvare med modelleringsfeilen, som er forskjellen mellom oppførselen til det virkelige systemet og oppførselen til modellen som har blitt brukt til å designe regulatoren. Hvis denne forskjellen hadde vært lik null, altså uten modellusikkerhet, så ville reguleringsfeilen også ha vært lik null. Derfor er et av hovedkonseptene bak den foreliggende oppfinnelsen å beregne en prediksjon av systemets oppførsel basert på en modell av totalsystemet, samt å bruke forskjellen mellom den virkelige og predikterte systemoppførselen – prediksjonsfeilen – til å drive integralvirkningen. Dermed vil integrasjonen kun baseres på informasjon som er relevant for å estimere systemets usikkerheter, og integrasjonen kan derfor foregå kontinuerlig – også i transientfasen – uten å bidra til overskyting eller ustabiliteter.

Et slikt konsept kunne også ha blitt kalt for modellbasert, prediksjonsbasert eller simulatorbasert integrasjon. Imidlertid ble begrepet modellprediktiv adaptiv regulering ansett for å være mer dekkende og beskrivende, spesielt for å kunne skille MPAC fra den mest utbredte adaptive løsningen i dag, som er modellreferanse adaptiv regulering (“model reference adaptive control, MRAC”). På samme måte som for PID-regulatorens integralvirkning drives de adaptive estimatene til majoriteten av MRAC-løsningene av reguleringsfeilen.

I det følgende vil hovedkonseptene bak MPAC illustreres gjennom et enkelt 1-dimensjonalt masse-demper (MD) system. MD-dynamikk kan representere oppførselen til mange fysiske systemer. Et 1-dimensjonalt MD-system tilsvarer typisk en frihetsgrad (“degree of freedom, DOF”) uten fjærkrefter, f.eks. jag- eller gir-frihetsgraden til et mekanisk system som et fly eller et skip. Derfor betraktes MD-systemet:

	$\dot{x} = v$	(1)
	$m^* \dot{v} + d(v)^* v = \tau^* + w,$	(2)

hvor $x \in \mathbb{R}$ representerer posisjonen, $v \in \mathbb{R}$ representerer hastigheten og $\dot{v} = a \in \mathbb{R}$ representerer systemets akselerasjon. I tillegg representerer $m^* > 0$ den virkelige masseparameteren, $d(v)^* > 0$ den virkelige, ulineære dempingsparameteren, $\tau^* \in \mathbb{R}$ det virkelige regulatorpådraget, mens $w \in \mathbb{R}$ representerer forstyrrelser fra omgivelsene.

Målet med reguleringen er å få MD-systemet til å følge bevegelsen til et referansemål med bevegelsesvariable $x_r \in \mathbb{R}$, $v_r \in \mathbb{R}$ og $a_r = \dot{v}_r \in \mathbb{R}$. Referansebevegelsen er typisk spesifisert av en menneskelig bruker eller et teknisk gaidingsystem. Derfor er reguleringsmålet å oppnå at både posisjonsfeilen $\bar{x} = x_r - x$ og hastighetsfeilen $\bar{v} = v_r - v$ begge går til null. Imidlertid er dette målet vanskelig å oppnå på grunn av usikkerhetene knyttet til m^* , $d(v)^*$, τ^* og w . Nåværende regulatorer forsøker å håndtere disse usikkerhetene ved å bruke integralvirkning eller gjennom adaptive metoder.

En modellbasert regulator for MD-systemet gitt av ligningene (1)-(2) er typisk designet basert på en matematisk modell, som representerer en beste gjetning av hvordan systemet oppfører seg. En slik modell kan uttrykkes som:

	$\dot{x} = v$	(3)
	$m\dot{v} + d(v)v = \tau + \theta,$	(4)

hvor posisjonen x og hastigheten v er systemtilstander som antas målbare og kjente, men hvor m , $d(v)$ og τ bare er estimater av de virkelige verdiene. I tillegg er w helt ukjent. I MPAC introduseres derfor variabelen θ for å representere samtlige modellusikkerheter og ukjente forstyrrelser, som i dette tilfellet vil være lik:

5

	$\theta = \Delta\tau + w - \Delta m\dot{v} - \Delta d(v)v,$	(5)
--	---	-----

hvor $\Delta\tau = \tau^* - \tau$, $\Delta m = m^* - m$ og $\Delta d(v) = d(v)^* - d(v)$. Altså samler θ summen av alle de ukjente leddene i én enkelt variabel, slik at systemmodellen gitt av ligningene (3)-(4) blir helt lik det faktiske systemet gitt av ligningene (1)-(2). Denne parametriseringen ligner på måten PID-regulatorens integralvirkning får i oppdrag å motvirke samtlige usikkerheter, noe den bare kan oppnå for usikkerhetseffekter som er konstante eller saktevarierende i forhold til reguleringsfeilens dynamikk. Samtidig skiller MPAC-parametriseringen seg tydelig fra standard adaptive reguleringsmetoder, hvor de ulike usikkerhetene blir delt inn i spesifikke kategorier som skal estimeres hver for seg. For såkalt indirekte adaptive metoder er kategoriene relatert til systemtilstandene, systemparametrene, regulatorpådraget, osv. For såkalt direkte adaptive metoder er kategoriene direkte relatert til regulatorparametrene. Dermed forsøker adaptive metoder å estimere flere ulike effekter samtidig, som er beslektet med systemidentifikasjon hvor målet er å identifisere individuelle modellkomponenter. Imidlertid fokuserer MPAC gjennom θ -parametriseringen kun på oppnåelse av reguleringsmålet, ved å estimere og motvirke den totale summen av usikkerhetene, og ikke ved å forsøke å identifisere de individuelle komponentene som utgjør denne summen. Derfor er MPAC en reguleringsorientert adaptiv metode.

10

15

20

Basert på ligningene (3)-(4) kan regulatoren designes slik at den består av to deler, som:

	$\tau = \tau_n - \theta_p$	(6)
--	----------------------------	-----

25

30

hvor τ_n er en nominell regulator basert på ligningene (3)-(4), og hvor θ_p er et adaptivt estimat av θ . Typisk vil τ_n bli designet for å oppnå en spesifikk lukket-sløyfe oppførsel for det nominelle systemet som tilsvarer $\theta = 0$ i ligning (4). Derfor er rollen til θ_p å prediktere og motvirke modellusikkerhetene representert ved θ , slik at det faktiske systemet kan oppnå lukket-sløyfe oppførselen som samsvarer med τ_n . I så måte er det verken hensiktsmessig eller ønskelig at τ_n i seg selv inneholder integralvirkning. Den nominelle regulatoren vil typisk bestå av en modellbasert foroverkobling, i dette tilfellet basert på ligning (4), samt en PD-type tilbakekobling.

Ved å bruke regulatoren gitt av ligning (6) for MD-systemet i ligning (4) oppnås følgende lukket-sløyfe system:

	$m\dot{v} + d(v)v = \tau_n + \tilde{\theta},$	(7)
--	---	-----

5 hvor $\tilde{\theta} = \theta - \theta_p$, og hvor målet til θ_p er å oppnå at $\tilde{\theta} \rightarrow 0$ slik at:

	$m\dot{v} + d(v)v = \tau_n.$	(8)
--	------------------------------	-----

Den adaptive oppdateringsloven for θ_p kan for eksempel designes ved å bruke Lyapunov-funksjonen:

10

	$V_\theta = \frac{1}{2} \left(m\tilde{v}^2 + \frac{1}{\lambda} \tilde{\theta} \right),$	(9)
--	--	-----

hvor $\tilde{v} = v - v_p$ er en prediksjonsfeil for hastigheten, v_p er en prediksjon av den målte hastigheten v , og $\lambda > 0$ er en adaptasjonsforsterkning. Det resulterende designet gir to oppdateringslover, én for prediksjon og én for adaptasjon. Konkret blir den såkalte

15 bevegelsesprediktoren lik:

	$\dot{v}_p = \frac{1}{m} (-d(v)v + \tau + \kappa\tilde{v} + \theta_p),$	(10)
--	---	------

hvor $\kappa > 0$ er en injeksjonsforsterkning som stabiliserer dynamikken til prediksjonsfeilen og gjør det mulig å tune raten som $\tilde{v} \rightarrow 0$. I tillegg blir den adaptive oppdateringsloven lik:

20

	$\dot{\theta}_p = \lambda\tilde{v},$	(11)
--	--------------------------------------	------

som er en ren integrasjon av prediksjonsfeilen \tilde{v} . Denne integralvirkningen skiller seg derfor tydelig fra integralvirkningen i en PID-regulator fordi sistnevnte er en ren integrasjon av reguleringsfeilen. Fordi MPACs integralvirkning ikke avhenger av reguleringsfeilen er det mulig å

25 integrere kontinuerlig, uavhengig av om lukket-sløyfe systemet er i en stasjonær eller transient

fase. Dette betyr at det adaptive estimatet gitt av ligning (11) kontinuerlig kan lære om systemets usikkerheter, og kan brukes i regulatoren uten at det fører til overskyting eller ustabiliteter.

Henvising er gjort til Figur 3 som viser en prinsippskisse for modellprediktiv adaptiv regulering i samsvar med oppfinnelsen. Figuren illustrerer hvordan den modellbaserte bevegelsesprediktoren gitt av ligning (10) samvirker med adaptasjonslovens integralvirkning gitt av ligning (11).

Bevegelsesprediktoren gitt av ligning (10) emulerer den virkelige MD-dynamikken gitt av ligning (2) ved å bruke en kombinasjon av MD-modellen gitt av ligning (4), det virtuelle tilbakekoblingsleddet $\kappa\tilde{v}$ og det adaptive estimatet θ_p . Det virtuelle modellprediktive adaptive regulatorsystemet gjør det følgelig mulig med kontinuerlig og rask estimering og motvirkning av modellusikkerheter.

For det 1-dimensjonale MD-systemet innebærer dermed MPAC-løsningen en nominell regulator τ_n som drives av reguleringsfeilene \bar{x} og \bar{v} , samt et modell-prediktivt adaptivt estimat θ_p som drives av prediksjonsfeilen \tilde{v} . Dermed blir den modellbaserte regulatoren lik:

	$\tau(\bar{x}, \bar{v}, \tilde{v}) = \tau_n(\bar{x}, \bar{v}) - \theta_p(\tilde{v}).$	(13)
--	---	------

Bevegelsesprediktoren gitt av ligning (10) kan også omskrives på formen:

15

	$\dot{v}_p = \frac{1}{m} \left(-d(v)v + \tau + \kappa\tilde{v} + \lambda \int_0^t \tilde{v}(t)dt \right),$	(12)
--	---	------

som viser at den består av en modellbasert foroverkobling basert på ligning (4) og en PI-type tilbakekobling basert på prediksjonsfeilen. MPAC kombinerer altså observerprinsippet, representert ved proporsjonal-leddet $\kappa\tilde{v}$, med adaptasjonsprinsippet, representert ved integralleddet $\lambda \int_0^t \tilde{v}(\sigma)d\sigma$.

Fordi det kombinerte prediktor-adaptor-systemet er et virtuelt dynamisk system, der dynamikken kun begrenses av systemets implementasjon i en prosessorenhet, kan det tilpasse seg ethvert fysisk system som i sammenligning utvikler seg saktere, dvs. slik at $\dot{\theta} = 0$ sammenlignet med $\dot{\theta}_p$. Dette betyr at adaptasjonsraten til MPAC kan være langt høyere enn adaptasjonsraten til en PID-regulator eller en MRAC-løsning, fordi raten til de sistnevnte begrenses av reguleringsfeilen. I praksis vil adaptasjonsraten til MPAC begrenses av hensyn til målestøy og systemets pådragsorganer.

Dette systemet kan også ses på som en selvstendig modul som kan implementeres i maskinvare, programvare eller begge deler. En slik modul kan brukes til å augmentere enhver nominell regulator for å kunne håndtere usikkerheter. I så måte er det viktig å forstå at lukket-sløyfe

30

oppførselen ikke kan bli bedre enn den som er forbundet med den nominelle regulatoren, ettersom MPAC-modulen kun sørger for å kompensere for modellusikkerheter slik at $\tilde{\theta} \rightarrow 0$.

Det er også viktig å påpeke at den modellprediktiv adaptive regulatoren kan estimere θ riktig helt uavhengig av om θ_p brukes i regulatoren eller ikke, noe som ikke er mulig med PID-
 5 regulatoren eller MRAC-løsninger, hvor integralvirkningen må være i lukket-sløyfe for å kunne oppnå riktig verdi. Denne egenskapen betyr at det adaptive estimatet sømløst kan kobles inn og ut av reguleringsløyfa ved behov, og at det ikke trenger en ny innkjøringstid når det skal kobles inn etter å ha vært koblet ut en periode. Dette muliggjør også sømløs svitsjing mellom aktive og
 10 passive prosessorenheter, som er nødvendig hvis den aktive regulerenheten feiler og en av de passive prosessorenhetene må ta over regulatoransvaret. Alle disse prosessorenhetene kan nemlig kjøre samme type modellprediktiv adaptiv regulator i parallell, uavhengig av om de er aktivt involvert i reguleringen eller ikke.

I tillegg til estimering av modellusikkerheter gjør også prediksjonsnaturen til MPAC det mulig å estimere umålte systemvariable. For eksempel kan det av ulike grunner være praktisk vanskelig å
 15 få målt MD-systemets hastighet v , som er påkrevd for å implementere prediktor-adaptor systemet gitt av ligningene (10)-(11). I dette tilfellet kan v estimeres gjennom målingen av x , på samme måte som θ kan estimeres gjennom målingen av v . Fremgangsmåten for å designe denne løsningen er identisk med den som ble brukt for å designe ligningene (10)-(11). Dette betyr at MPAC-løsningen egner seg like bra til å estimere umålte systemvariable som til å estimere
 20 modellusikkerheter, noe som er mulig fordi MPAC kombinerer observerprinsippet med adaptjonsprinsippet, og dermed har en dobbel natur.

En oppsummering av fordeler ved å bruke prediksjonsfeil istedenfor reguleringsfeilen til å drive det adaptive estimatet:

- Unngår integrasjon av den uønskede transientkomponenten til reguleringsfeilen i
 25 transientfasen. Slik integrasjon er som nevnt hovedårsaken til at PID-regulering fører til overskyting og ustabiliteter ved endring i referansesignalet. Til sammenligning inneholder prediksjonsfeilen kun relevant informasjon å integrere på.
- Unngår muligheten for ubegrenset vekst i integralleddet som et resultat av at referansesignalet beveger seg for raskt i forhold til det fysiske systemet, noe som vil resultere i
 30 voksende reguleringsfeil. Dette kan ikke skje ved integrasjon av prediksjonsfeilen fordi den ikke inneholder referansesignalet, og adaptjonen foregår helt uavhengig av reguleringsfeilens verdi.
- Unngår kompleks implementasjon av funksjonalitet for myk overgang ("bumpless transfer") når det må svitsjes fra en prosessorenhet til en annen. Slik overføring er påkrevd

ved bruk av PID-regulatorer for å unngå diskontinuitet i regulatorpådraget når den aktive prosessorenheten feiler. Ved integrasjon av prediksjonsfeil vil både aktive og passive prosessorenheter oppnå samme adaptive estimat og det kan derfor svitsjes sømløst mellom dem.

- 5
- Unngår standardkravet for adaptasjon om “matchende tilstander” (matching conditions), som betyr at regulatorpådraget og modellusikkerhetene må befinne seg på samme nivå i systemmodellen for å kunne estimere sistnevnte. Ved integrasjon av prediksjonsfeilen er det imidlertid irrelevant hvor usikkerhetene befinner seg relativt til regulatorpådraget. Denne egenskapen peker også på den doble observer-adapsjons-naturen til et prediktor-adaptor system.
- 10

Når det gjelder adaptiv regulering pekes det generelt på to fundamentale utfordringer:

1. Et ønske om å separere tidsskalaen forbundet med adaptasjonen fra tidsskalaen forbundet med det fysiske systemet. Kort sagt er adaptive systemer tryggere å bruke når disse tidsskalaene er betydelig separert.
 - 15 2. Et behov for såkalt persistent eksitasjon, som betyr at riktig estimering kun er mulig når signalene som driver de adaptive estimatene inneholder tilstrekkelig variert informasjon. Hvis denne betingelsen ikke er tilfredsstillt, så vil adaptive regulatorer som forsøker å estimere flere individuelle modellkomponenter samtidig oppleve et midlertidig ustabilitetsfenomen etter en viss tidsperiode i stasjonærfasen. Årsaken er at den eneste informasjonen som det kan læres fra i denne fasen er målestøyen, noe som kan forårsake uforutsigbar og ustabil reguleringsoppførsel. Derfor blir oppdatering av de adaptive estimatene ofte slått av i stasjonærfasen.
- 20

MPAC løser begge disse utfordringene som følger:

1. Fordi prediktor-adaptor systemet er et virtuelt dynamisk system er det mulig å oppnå en betydelig separasjon av tidsskalaen til adaptasjonen fra tidsskalaen til det fysiske systemet som skal reguleres. Denne separasjonen er ikke mulig med et adaptivt estimat som drives av reguleringsfeilen, fordi denne feilen ikke kan reguleres fortere til null enn dynamikken til det fysiske systemet tillater. MPAC kan derfor motvirke forstyrrelser helt uavhengig av hvor raskt reguleringsfeilen går til null.
 - 25 2. Ved å bruke kun ett adaptivt estimat oppnås automatisk kravet om persistent eksitasjon og dermed unngås faren for midlertidig ustabilitet i stasjonærfasen. Derfor kan adaptasjonen foregå kontinuerlig og uavhengig av om lukket-sløyfe systemet er i en stasjonær eller transient fase.
- 30

MPAC kan altså adaptere raskere enn både PID-regulatorens integralvirkning og MRACs adaptive estimater. Samtidig kan MPAC adaptere kontinuerlig, i motsetning til PID-regulatorens

35

integralvirkning som bør slås av i transientfasen, eller i motsetning til MRACs adaptive estimater som bør slås av i stasjonærfasen.

Ved bruk av MPAC i applikasjoner som dynamisk posisjonering av instrumenterte kabler bør prediktor-adaptor systemets dynamiske tilstander initialiseres hensiktsmessig.

5 Videre bør man vite mest mulig om totalsystemet for posisjoneringen av de instrumenterte kablene slik at informasjon om strukturen og parametrene til systemdynamikken, aktuator-dynamikken og de mulige forstyrrelsene danner grunnlaget for oppsett av den nominelle regulatoren, da adaptive systemer aldri kan kompensere for en grunnleggende mangel på systeminformasjon. Slik informasjon eliminerer ukjente faktorer som ellers kan vise seg å gjøre
10 systemoperasjon umulig.

Videre er det en forutsetning å identifisere de viktigste tidsskalaene forbundet med reguleringsproblemet, og deretter velge regulator-, prediksjons- og adaptasjonsforsterkningene tilsvarende. I MD-eksempelet tilhører de viktigste tidsskalaene det fysiske systemet og prediktor-adaptor systemet. I den virkelige verden vil tidsskalaen for aktuatordynamikken også være viktig. Det er
15 aktuatorene som fysisk skal implementere kommandoene fra regulatoren, og disse er typisk betydelig raskere enn det dynamiske systemet som skal reguleres.

Videre er det fordelaktig å unngå at målestøy påvirker det fysiske systemet gjennom aktuatorene, noe som kan oppnås ved å kontrollere raten som det adaptive estimatet slippes inn i reguleringsløyfen på, for eksempel ved bruk av ulineær filtrering. Denne raten må tilsvare det
20 som er fysisk mulig med aktuatorene og samtidig unngå unødvendig slitasje.

Kort oppsummert er de tre fundamentale aspektene ved MPAC som følger:

1. Alle modellusikkerhetene samles i én enkelt variabel som skal estimeres.
2. Det adaptive estimatet drives av prediksjonsfeilen og ikke av reguleringsfeilen.
3. Dynamikken til prediksjonsfeilen stabiliseres gjennom virtuell tilbakekobling i prediktoren.

25 Det er kombinasjonen av disse aspektene som gir MPAC sine unike egenskaper. Eksempelet med MD-systemet viser MPAC-konseptet i sin enkleste og mest grunnleggende form, men konseptet gjelder generelt og kan anvendes for vilkårlig store og komplekse systemer.

Med den foreliggende oppfinnelsen oppnås gjennom MPAC en ny adaptiv regulatorløsning som er motivert av ulempene ved PID-regulatorens integralvirkning. Slik sett representerer MPAC en
30 litt mer kompleks metode enn standard PID, men løser samtidig de to fundamentale utfordringene med adaptiv regulering. Sammenlignet med PID og standard adaptive regulatorer som MRAC kan MPAC adaptere kontinuerlig og samtidig raskere, uten samme type fare for ustabiliteter i lukket-sløyfe systemet. MPAC sin rolle er å hjelpe den nominelle regulatoren med å eliminere de gjenværende usikkerhetene, samt å gi robusthet hvis ukjente hendelser inntreffer underveis.

Denne måten å løse dynamisk posisjonering av instrumenterte kabler vil ha store fordeler ettersom instrumenterte kabler er utsatt for påvirkning fra miljøet som ikke på en enkel måte lar seg måle.

Ytterligere fordelaktige trekk og detaljer ved den foreliggende oppfinnelsen vil fremgå av den etterfølgende eksempelbeskrivelsen.

Eksempel

Den foreliggende oppfinnelsen vil nedenfor bli beskrevet mer detaljert med henvisning til de vedlagte tegningene, hvor:

10 Fig. 1 viser en prinsippskisse av et eksempel på et trukket seismisk instrumentert kabel-spread bak et kartleggingsfartøy,

Fig. 2 viser en prinsippskisse av en utførelsesform av en styringsinnretning hvor vingene er forsynt med sensorer og elektronikk,

15 Fig. 3 viser en prinsippskisse for modellprediktiv adaptiv regulering i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen, og

Fig. 4 viser en prinsippskisse for absolutt og relativ dynamisk posisjonering av marine instrumenterte kabler ved bruk av modellprediktiv adaptiv regulering.

Henviser nå til Figur 1 som viser en prinsippskisse av et eksempel på et typisk instrumentert seismisk kabel-spread, hvor seismiske instrumenterte kabler 100 trekkes bak et kartleggingsfartøy 110. Hver instrumenterte kabel 100 er forsynt med styringsinnretninger 20 innrettet for tilkobling i serie mellom to tilliggende instrumenterte kabelseksjoner 100a av en multi-seksjonskabel 100, for styring av den instrumenterte kablen 100. På enden av hver instrumenterte kabel 100 kan det enten anordnes en halebøye (ikke vist) eller en styringsinnretning 20 forsynt med en GNSS-enhet 25 (ikke vist). Hele kabel-spreadet styres av en styringssentral 111 ombord på fartøyet 110.

Henviser nå til Figur 2 som viser en prinsippskisse av et eksempel på en utførelsesform av en styringsinnretning 20 av kjent teknikk.

Styringsinnretningen 20 er dannet av en hovedkropp 21 og tre separate avtakbare vinger 22, fortrinnsvis såkalte smartvinger, hvilke er jevnt fordelt rundt hovedkroppen 21, og er en såkalt treakset bird. Hovedkroppen 21 er hovedsakelig et langstrakt strømlinjeformet rørformet hus, som ved sine ender omfatter tilkoblingsmidler 23a og 23b tilpasset for mekanisk og elektrisk tilkobling i serie mellom kabelseksjoner 100a i den seismisk instrumenterte kablen 100. Tilkoblingsmidlene 23a-b er for dette tilpasset tilsvarende tilkoblingspunkter (ikke vist) i hver ende av hver kabelseksjon 100a, hvilke tilkoblingspunkter normalt brukes til å koble sammen to tilliggende kabelseksjoner 100a. Vingene 22 er videre separat avtakbart festet til hovedkroppen 21.

Hovedkroppen 21 er videre forsynt med en prosessorenhet (ikke vist), trykksensor (ikke vist), samt tre induktive koblinger (ikke vist) for trådløs kommunikasjon og energioverføring til vinger 22 eller tre mekaniske koblinger (ikke vist) for kommunikasjon og energioverføring. I tillegg kan hovedkroppen 21 videre omfatte treghets-cluster (IMU) (ikke vist) omfattende ett eller flere akselerometre og eventuelt rategyro, samt eventuelt hastighetssensorer for å måle hastighet gjennom vann.

Vingene 22 er forsynt med en prosessorenhet (ikke vist), induktiv kobling (ikke vist) eller mekanisk kobling (ikke vist) for tilkobling til hovedkroppen 21 for kommunikasjon og energioverføring, halleffektssensor (ikke vist), oppladbare bufferbatterier 37 (Fig. 3), intelligent ladeelektronikk (ikke vist), samt motor med gir for styring av vingene 22.

Videre kan en styringsinnretning 20 som dette i minst en av vingene 22 være forsynt med akustiske kommunikasjonsmidler (ikke vist) i form av et sender-/mottakerelement, i form av en transduser, samt forsynt med elektronikk for akustisk avstandsmåling. I tillegg eller i stedet kan akustiske transdusere være anordnet som en del av den instrumenterte kablen 100 eller være anordnet i egne noder.

Styringsinnretninger 20 som dette kan videre omfatte en GNSS-enhet (ikke vist) bestående av en GNSS-antenne og en GNSS-mottaker anordnet i minst en av styringsinnretningens vinger 22, hvor GNSS-antennen fortrinnsvis er anordnet i vingespissen.

Slike styringsinnretninger 20 kan også omfatte en radioenhet (ikke vist) for dataoverføring bestående av en radioantenne og en radiomottaker anordnet i minst en av styringsinnretningens vinger 22, hvor radioantennen fortrinnsvis er anordnet langs kanten av vingen 22 som vender fremover, dvs. i taueretningen.

Styringsinnretning 20 kan videre omfatte et 3-akset magnetometer (ikke vist) i minst en av styringsinnretningens vinger 22, hvilket magnetometer fortrinnsvis er anordnet nær vingespissen. Videre kan styringsinnretningen 20 være forsynt med et treghets-cluster (IMU) (ikke vist) omfattende ett eller flere akselerometre og eventuelt rategyro, hvilket treghets-cluster er anordnet i minst en av styringsinnretningens 20 vinger 22.

Henviser nå til Fig. 4 som viser en prinsippskisse for absolutt og relativ dynamisk posisjonering av marine instrumenterte kabler 100 ved bruk av modellprediktiv adaptiv regulering som beskrevet i den generelle delen av oppfinnelsen ovenfor.

For dynamisk posisjonering av marine tauede instrumenterte kabler 100 implementeres ett adaptivt estimat for hver styringsinnretning 20 langs de instrumenterte kablene 100.

Systemet i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen kan deles opp i fire moduler; Gaiding-system/referansesystem 40, reguleringssystem 50, fysisk system 60 og en modellprediktiv adaptiv regulator 70. Det fysiske systemet 60 vil typisk kunne representeres som vist ved dynamikk for

styringsinnretning 61, kabelgruppe-dynamikk 62 og et målesystem 63 for bevegelser.

Målesystemet 63 kan omfatte en eller flere av følgende midler:

- akustikk for relativ posisjonsmåling mellom noder,
- GNSS for absolutt posisjons-/hastighetsmåling av noder,
- 5 - treghetssensorer og magnetometer for måling av vinkelhastigheter og orientering for noder.

Reguleringssystemet 50 omfatter en nominell regulator 51 pr styringsinnretning 20 som får sin posisjonsreferanse 41 fra et gaidingsystem/referansesystem 40, eksempelvis et STAP-system, typisk innrettet i styringssentralen 111 ombord på fartøyet 110. Den nominelle regulatoren 51
10 består fortrinnsvis av en modellbasert foroverkobling, samt en PD-type tilbakekobling.

Gaidingsystemet 40 genererer posisjonsreferanse 42 for hele den instrumenterte kabelgruppen, og avledet fra denne posisjonsreferanse 43 for hver enkelt instrumenterte kabel 100 og posisjonsreferanse 41 for hver styringsinnretning 20 på hver instrumenterte kabel 100. Videre omfatter systemet en modellprediktiv adaptiv regulator 70 pr styringsinnretning 20 i form av en
15 kabelgruppe-bevegelsesprediktor 71 og en adaptjonslov 72 som tilveiebringer et adaptivt estimat 73 og drives av en prediksjonsfeil 74 som beregnes av kabelgruppe-bevegelsesprediktoren 71 som omfatter en simulert dynamisk prediksjonsmodell av det totale systemet.

Gaidingsystem/referansesystemet 40, reguleringssystemet 50 og den modellprediktive adaptive regulatoren 70 kjøres i en eller flere programmoduler på en eller flere datamaskiner/
20 prosessorenheter (ikke vist) på slepefarkosten 110. Konfigurasjonen av instrumenterte kabler 100 med styringsinnretninger 20 og deres relative avstander på de instrumenterte kablene 100 er kjent av alle kjørende programmoduler.

Referansesystemet/gaidingsystemet 40 består av flere blokker som følger: ut ifra en kartleggingsplan 44 genereres en posisjonsreferanse 42 for hele kabelgruppen, typisk vil denne
25 referansen være gitt kun i horisontalplanet. En kartleggingsplan er en plan for hvilke linjer/buer på kartet et punkt på kabelgruppen skal traversere. I planen ligger gjerne også informasjon om dybde langs sporet, foretrukket sleperetning, antall skuddpunkt pr flateareal langs sporet, osv. Resulterende horisontal posisjonsreferanse 43 for hver instrumenterte kabel 100 genereres basert på posisjonsreferansen 42 for hele kabelgruppen. Dybde- og rullreferanse 45 for hver
30 instrumenterte kabel 100 gis typisk av en operatør avhengig av operasjonelle forhold, men kan også være detaljert i kartleggingsplanen 44, som nevnt ovenfor. Dybdereferanse er ønsket dybde for hver enkelt kabel/styringsinnretning. Rullreferanse er ønsket rullvinkel om den instrumenterte kabelens lengdeakse. Rullreferansen er ikke en nødvendig parameter for at systemet skal fungere, men vil kunne benyttes for å forbedre signal/støy-forhold på akustikken. Operatør kan også

overstyre den predefinerte referansen i horisontalplanet avhengig av operasjonelle forhold. Dette kan gjøres for vilkårlig antall seksjoner 100a i hver instrumenterte kabel 100.

Den modellprediktive adaptive regulatoren 70 inneholder som nevnt en prediksjonsmodell som er en simulert dynamisk modell av hele systemet som består av slepefarkost 110, kabelgruppe
 5 med styringsinnretninger 20 samt annet utstyr som bidrar til kraftbalansen som f.eks. halebøyer, gun-array og deflektoranordninger (dører). Typiske pådragsdata i prediksjonsmodellen er slepefarkostens 110 kommanderte thrust og ror, kommanderte krefter fra styringsinnretningene 20 langs de instrumenterte kablene 100 samt målte/estimerte krefter fra omgivelsene som vind, havstrøm og bølger. Vindkraft og -retning måles typisk med en vindmåler på slepefarkosten 110.
 10 Bølger og bølgeretning kan eksempelvis måles med bruk av GNSS og treghetssensorer på havbøyer, evt. estimeres i DP-programvare. Havstrøm estimeres typisk også i DP-programvare. De resulterende kreftene fra slepefarkost 110, styringsinnretninger 20 og eventuelt halebøye, samt eksterne forstyrrelser bestemmer posisjonene i kabelgruppen. Typiske måledata i prediksjonsmodellen er bevegelsesdata for de ulike komponentene i totalsystemet herunder posisjon og
 15 hastighet til slepefarkosten 110, noder langs de instrumenterte kablene 100 og halebøyene, eventuelt styringsinnretninger som erstatter halebøyene.

Den nominelle 51 og modellprediktive adaptive regulatoren 70 er avhengige av statusoppdateringer fra de respektive styringsinnretningene 20 slik at det kan tas hensyn til unntakstilfeller. Vinger 22 i metning eller feil i enkeltvinger 22 må behandles spesielt og kan gi
 20 begrensninger i den kommanderte resultantkraften pr styringsinnretning 20 for å unngå problematikk knyttet til ulineariteter i vingenes 22 løfteevne (*stalling*).

Hvordan systemet i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen fungerer vil nå bli beskrevet. Gaidingsystemet/referansesystemet 40 setter opp posisjonsreferanse 42 for kabelgruppen og generer posisjonsreferanse 43 for hver enkelt instrumenterte kabel 100 og posisjonsreferanse 41
 25 hver enkelt styringsinnretning langs 20 de instrumenterte kablene 100 basert på posisjonsreferansen 43 og dybde- og eventuelt rullreferanse 45. Dette er input til den nominelle regulatoren 51 som styrer hver respektive styringsinnretning 20 for å oppnå den nevnte posisjonsreferansen 41 gjennom et kraftpådrag som gir styringsinnretningen en kommandert lateral og/eller vertikal kraft ved å justere styringsinnretningens 20 vinger 22. Samtidig med dette
 30 benyttes den modellprediktive adaptive regulatoren 70 til kompensering av kraftpådraget fra den nominelle regulatoren 51 for å motvirke effektene av umodellert dynamikk, usikkerhet i modellparametre, samt varierende eksterne forstyrrelser fra miljøet og operasjonelt utstyr.

Ettersom den modellprediktive adaptive regulatoren 70 er basert på en dynamisk prediksjonsmodell av totalsystemet, samt kunnskap om kraftpådrag fra fremdriftsmidlene/ styringsmidlene til
 35 det tauende fartøyet 110 og muligens også det operasjonelle utstyret, er den innrettet for in-situ å

simulere og prediktere totalsystemets bevegelse. Desto bedre kunnskap man har om den dynamiske modellen av totalsystemet, desto bedre vil den nominelle regulatoren 51 virke, og desto mindre usikkerhet må den adaptive regulatoren ta høyde for. Således vil det være en fordel at den dynamiske modellen er så optimal som mulig. Avviket mellom prediktert bevegelsestemat fra kabelgruppe-bevegelsesprediktoren 71 og bevegelsesmålinger fra målesystemet 63 gir en prediksjonsfeil 74 som driver det adaptive estimatet 73 som basert på dette både justerer kraftpådraget satt av den nominelle regulatoren 51 for styringsinnretningene 20 langs de instrumenterte kablene 100, samt at prediksjonsfeilen 74 også benyttes til å oppdatere kabelgruppe-bevegelsesprediktoren 71.

10 Dette medfører at man oppnår en raskere respons i styringsinnretningene 20 når forstyrrelser fra omgivelsene endrer seg, samtidig som man unngår sprang i pådragsorganene (motorer som styrer vingene 22) ved plutselig endring av posisjonsreferansen for de instrumenterte kablene 100.

Gjennom kontinuerlig oppdatering av kabelgruppe-bevegelsesprediktoren 71 kan man sørge for at denne til enhver tid best mulig gjenspeiler totalsystemets dynamikk.

15

Modifikasjoner

Hele det modellprediktive adaptive reguleringsystemet kan også implementeres lokalt på hver styringsinnretning 20 i stedet for en global implementasjon på slepefarkosten 110. Konsekvensen er at de lokale prediksjonsmodellene ikke beskriver interaksjonen mellom kabelseksjoner 100a 20 montert etter hverandre eller mellom slepefarkosten 110 og hver enkelt instrumenterte kabel 100. Det blir dermed mer modellusikkerhet som må tas opp i den adaptive estimatoren.

Patentkrav

1. Fremgangsmåte for dynamisk posisjonering av en instrumentert tauet kabel (100) i vann, så som en marin seismisk streamer, og/eller et instrumentert tauet kabel-array (streamer-array), til
5 hvilken instrumentert kabel (100) styringsinnretninger (20) er anordnet for å styre de individuelle instrumenterte kablene (100) både i form og posisjon i forhold til andre instrumenterte kabler (100) og dermed motvirke sidestrøm og/eller andre dynamiske krefter som virker på et trukket kabel-array bak et seismisk kartleggingsfartøy (110), på hvilket fartøy (110) er anordnet en styringssentral (111) for styring av den instrumenterte kabelen (100) eller kabel-arrayet, hvilken
10 styringssentral (111) er innrettet for å kommunisere med de instrumenterte kablene (100) og styringsinnretningene (20), hvor fremgangsmåten omfatter:

- benyttelse av en nominell regulator (51) for hver styringsinnretning (20) for styring av den instrumenterte kabelen (100) basert på forkunnskaper om egenskapene til totalsystemet bestående av farkost/fartøy (110) med fremdriftsmidler/styringsmidler, instrumenterte kabler
15 (100) og styringsinnretninger (20), **karakterisert ved** at fremgangsmåten videre omfatter:
 - benyttelse av en modellprediktiv adaptiv regulator (70) for hver styringsinnretning (20), hvilken modellprediktive adaptive regulator (70) er forsynt med en kabelgruppe-bevegelsesprediktor (71), hvilken samler summen av alle modellusikkerheter i én enkelt variabel, og en adaptjonslov (72) som tilveiebringer et adaptivt estimat (73) som drives av en prediksjonsfeil
20 (74) gitt av avvik mellom prediktert bevegelsesestimat fra kabelgruppe-bevegelsesprediktoren (71) og bevegelsesmålinger fra et målesystem (63), hvilket adaptive estimat (73) benyttes for kompensering av kraftpådrag for styringsinnretningene (20) langs de instrumenterte kablene (100) fra den nominelle regulatoren (51) for å motvirke effektene av umodellert dynamikk, usikkerhet i modellparametre, samt varierende eksterne forstyrrelser fra miljøet og operasjonelt utstyr.

25

2. Fremgangsmåte i samsvar med patentkrav 1, **karakterisert ved** at den omfatter å benytte kabelgruppe-bevegelsesprediktoren (71) for in-situ simulering og prediktering av totalsystemets bevegelse for å beregne et prediktert bevegelsesestimat ved benyttelse av en dynamisk prediksjonsmodell av totalsystemet, samt eventuelt informasjon om eksterne krefter fra naturen
30 eller operasjonelt utstyr som påvirker kraftbalansen for de instrumenterte kablene (100).

3. Fremgangsmåte i samsvar med patentkrav 1, **karakterisert ved** at den omfatter utføring av bevegelsesmålinger omfattende en eller flere av følgende:

- relativ posisjonsmåling mellom noder basert på akustikk,
- 35 - absolutt posisjons-/hastighetsmåling av noder basert på Globalt Navigasjonssatellittsystem,

- måling av vinkelhastigheter og orientering basert på treghetssensorer og magnetometer for noder.

4. Fremgangsmåte i samsvar med patentkrav 1, **karakterisert ved** å stabilisere prediksjonsfeilen (74) gjennom tilbakekobling i kabelgruppe-bevegelsesprediktoren (71).
5. Fremgangsmåte i samsvar med patentkrav 1, **karakterisert ved** å benytte prediksjonsfeilen (74) til å oppdatere kabelgruppe-bevegelsesprediktoren (71).
- 10 6. Fremgangsmåte i samsvar med patentkrav 1, **karakterisert ved** å drive den nominelle regulatoren (51) med en posisjonsreferanse (41) for hver styringsinnretning (20) generert fra en kartleggingsplan (44) og/eller manuelle innstillinger for dybde- og/eller rull-referanser (45).
- 15 7. System for dynamisk posisjonering av en instrumentert tauet kabel (100) i vann, så som en marin seismisk streamer, og/eller et instrumentert tauet kabel-array (streamer-array), til hvilken instrumentert kabel (100) styringsinnretninger (20) er anordnet for å styre de individuelle instrumenterte kablene (100) både i form og posisjon i forhold til andre instrumenterte kabler (100) og dermed motvirke sidestrøm og/eller andre dynamiske krefter som virker på et trukket kabel-array bak et seismisk kartleggingsfartøy (110), på hvilket fartøy (110) er anordnet en
- 20 styringssentral (111) for styring av den instrumenterte kabelen (100) eller kabel-arrayet, hvilken styringssentral (111) er innrettet for å kommunisere med de instrumenterte kablene (100) og styringsinnretningene (20), hvilket system omfatter en nominell regulator (51) for hver styringsinnretning (20) for styring av den instrumenterte kabelen (100) basert på forkunnskaper om egenskapene til totalsystemet bestående av farkost/fartøy (110) med
- 25 fremdriftsmidler/styringsmidler, instrumenterte kabler (100) og styringsinnretninger (20), **karakterisert ved** at systemet videre omfatter:
- en modellprediktiv adaptiv regulator (70) for hver styringsinnretning (20), hvilken modellprediktive adaptive regulator (70) er forsynt med en kabelgruppe-bevegelsesprediktor (71), hvilken samler summen av alle modellusikkerheter i èn enkelt variabel, og en adaptjonslov (72)
- 30 som tilveiebringer et adaptivt estimat (73) som drives av en prediksjonsfeil (74) gitt av avvik mellom prediktert bevegelsesestimat fra kabelgruppe-bevegelsesprediktoren (71) og bevegelsesmålinger fra et målesystem (63), hvilket adaptive estimat benyttes for kompensering av kraftpådrag for styringsinnretningene (20) langs de instrumenterte kablene (100) fra den nominelle regulatoren (51) for å motvirke effektene av umodellert dynamikk, usikkerhet i
- 35 modellparametre, samt varierende eksterne forstyrrelser fra miljøet og operasjonelt utstyr.

8. System i samsvar med patentkrav 7, **karakterisert ved** at kabelgruppe-bevegelsesprediktoren (71) er forsynt med en dynamisk prediksjonsmodell av totalsystemet, samt er innrettet til å motta informasjon om eksterne krefter fra naturen eller operasjonelt utstyr som påvirker kraftbalansen for de instrumenterte kablene (100), for in-situ å simulere og prediktere totalsystemets bevegelse.
- 5
9. System i samsvar med patentkrav 7, **karakterisert ved** at systemet omfatter et målesystem (63) for bevegelsesmåling omfattende en eller flere av følgende:
- akustikk for relativ posisjonsmåling mellom noder,
 - Globalt Navigasjonssatellittsystem for absolutt posisjons-/hastighetsmåling av noder,
 - 10 - treghetssensorer og magnetometer for måling av vinkelhastigheter og orientering for noder.
10. System i samsvar med ett av patentkravene 7-9, **karakterisert ved** at systemet omfatter et gaidings- eller referansesystem (40) innrettet til å motta en kartleggingsplan (44) og/eller manuell innstilling av dybde- og/eller rull-referanser (45), samt innrettet for å generere posisjonsreferanse (42) for kabelgruppe, posisjonsreferanse (43) for hver enkelt instrumentert kabel (100) og posisjonsreferanse (41) for hver styringsinnretning (20).
- 15
11. System i samsvar med ett av patentkravene 7-10, **karakterisert ved** at den nominelle regulatoren (51) er drevet av posisjonsreferansen (41) for hver styringsinnretning (20).
- 20

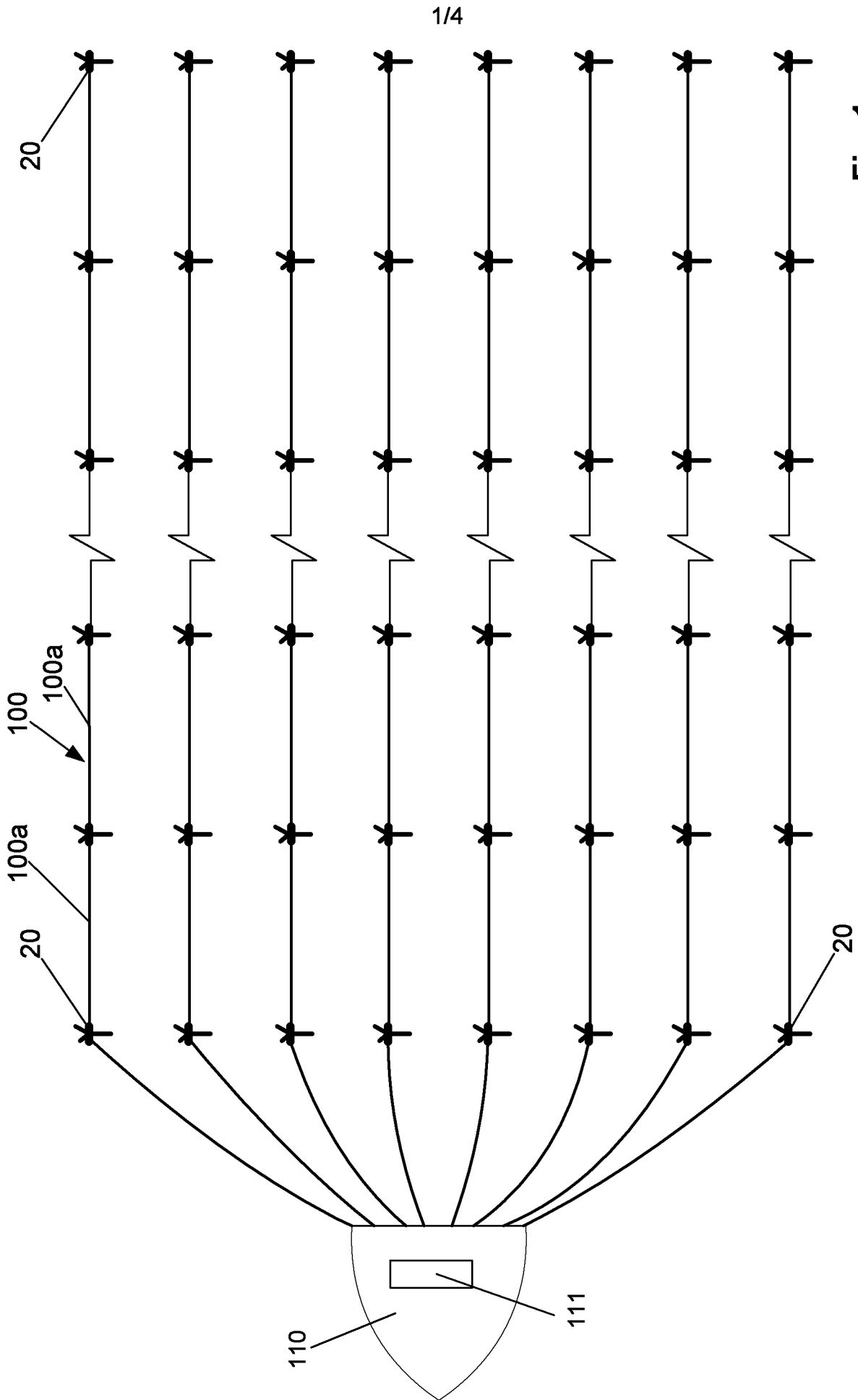


Fig. 1.

2/4

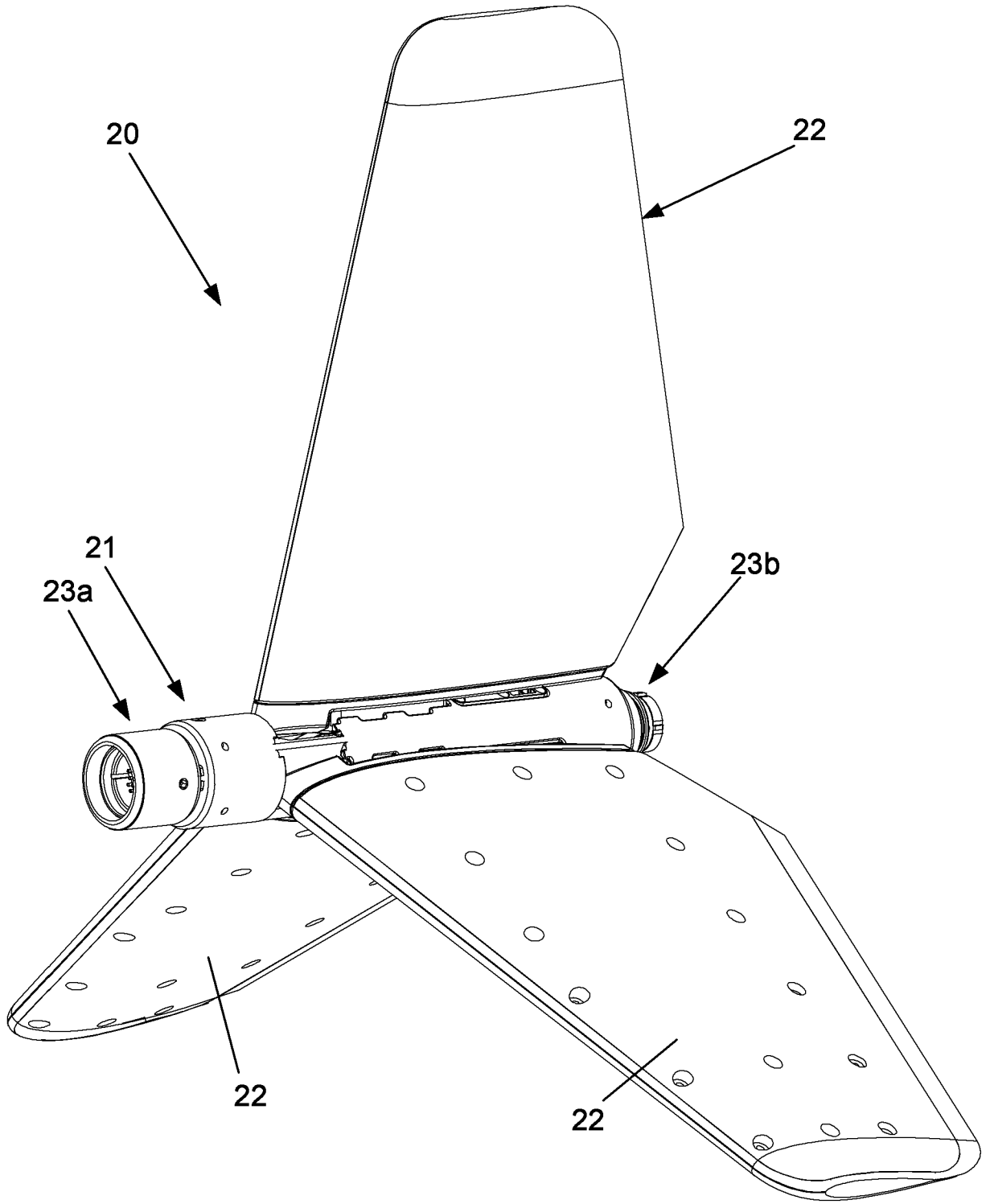


Fig. 2.

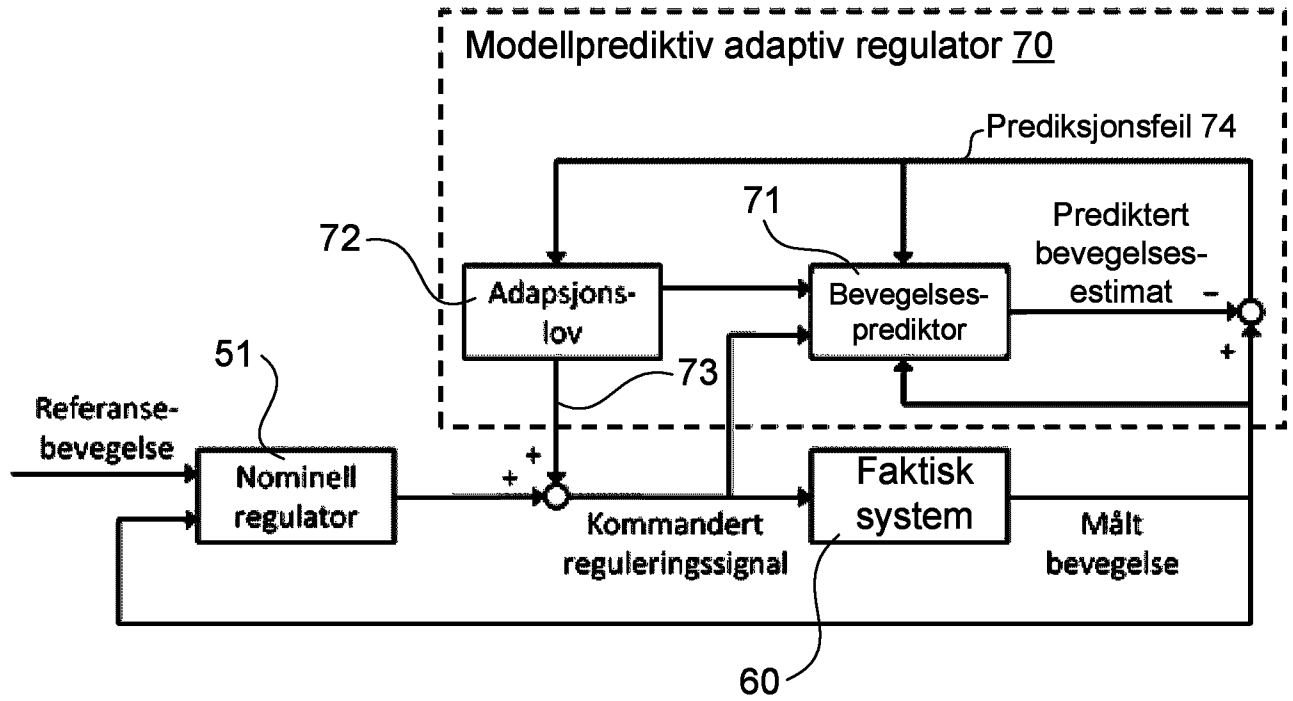


Fig. 3.

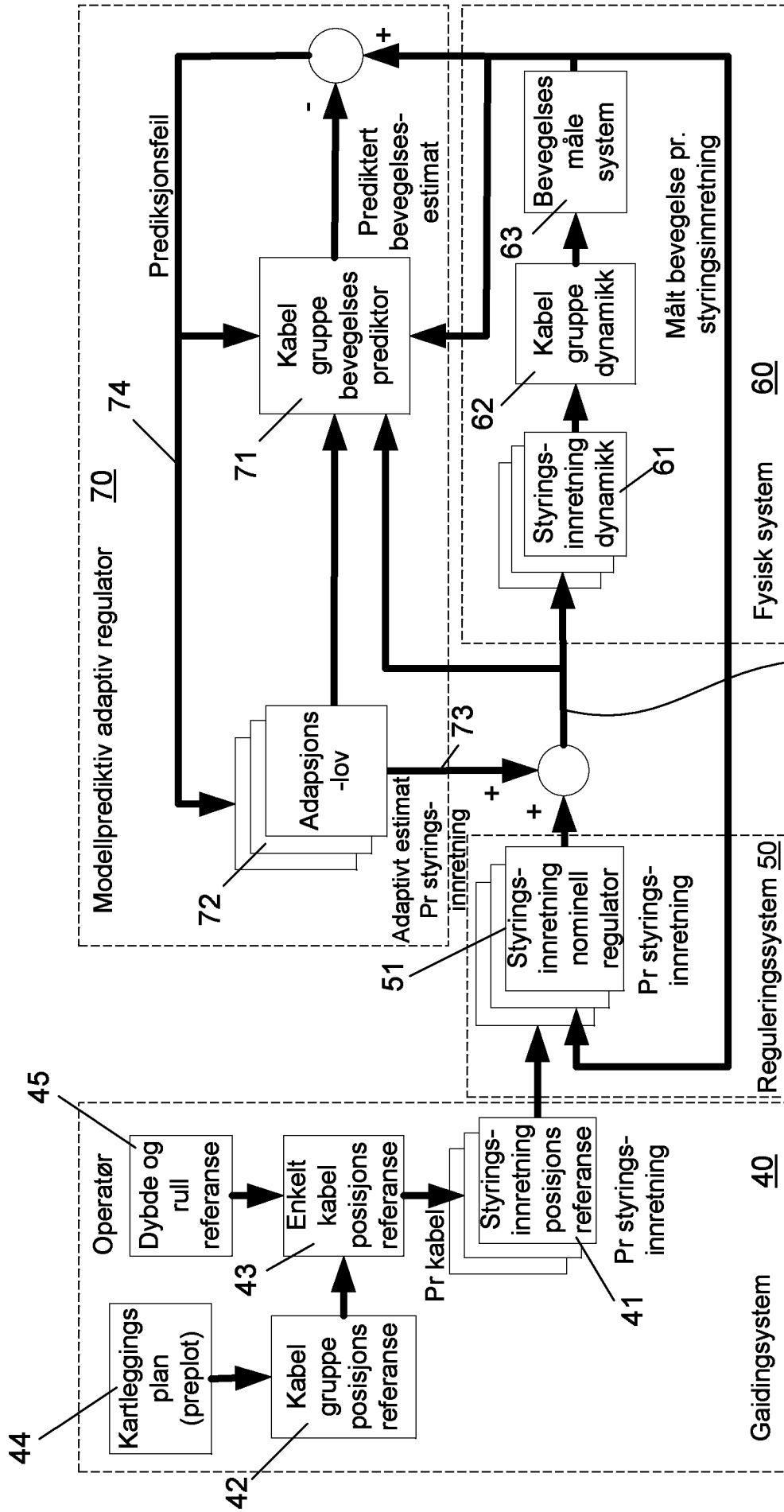


Fig. 4.

Kommandert reguleringsignal
omfattende lateral/vertikal
kommandert kraft pr styringsinnretning