



TESIS - TE142599

DESAIN DAN SIMULASI GERAK KONTROL KEDALAMAN PADA MARES AUV MENGGUNAKAN NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL

ANINDYA DWI RISDHAYANTI
2214202004

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Moch. Rameli
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

**DESAIN DAN SIMULASI GERAK KONTROL
KEDALAMAN PADA MARES AUV MENGGUNAKAN
NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL**

ANINDYA DWI RISDHAYANTI
2214202004

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Moch. Rameli
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

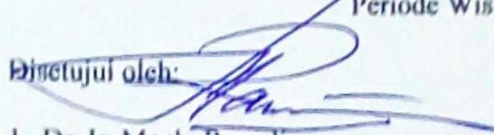
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

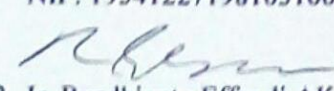
oleh:

Anindya Dwi Risdhayanti
NRP. 2214202004

Tanggal Ujian : 9 Juni 2017
Periode Wisuda : September 2017

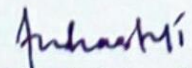
Dijetujui oleh:


1. Dr. Ir. Moch. Rameli (Pembimbing I)
NIP: 195412271981031002


2. Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT. (Pembimbing II)
NIP: 195704241985021001


3. Prof. Dr. Ir. Mochammad Nuh, DEA (Penguji)
NIP: 195906171984031002


4. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M. Eng. (Penguji)
NIP: 19590219198101001


5. Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT. (Penguji)
NIP: 196808121994032001



DEKAN FAKULTAS Teknologi Elektro

Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul "**DESAIN DAN SIMULASI GERAK KONTROL KEDALAMAN PADA MARES AUV MENGGUNAKAN NMPC**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 9 Juni 2017



Anindya Dwi Risdhayanti

NRP. 2214202004

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN DAN SIMULASI GERAK KONTROL KEDALAMAN PADA MARES AUV MENGGUNAKAN NMPC

Nama mahasiswa : Anindya Dwi Risdhayanti
NRP : 2214202004
Pembimbing : 1. Dr. Ir. Moch. Rameli
2. Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

ABSTRAK

Autonomous Underwater Vehicles (AUV) merupakan suatu sistem yang nonlinier. Kesulitan masalah desain sistem kontrol pada *underwater vehicles* dikarenakan dinamika nonlinier-nya, model tak tentu, dan kemunculan *disturbance* yang susah untuk diukur atau diestimasi. Dinamika kontrol dari *vehicle* membutuhkan jaminan kestabilan dan tampil secara konsisten. Kesulitan masalah desain sistem kontrol pada dinamika AUV adalah metodologi desain tradisional linier tidak dapat diakomodasi secara mudah.

Pada penelitian ini dibangun *nonlinear disturbance observer* yang didapatkan dari *model predictive control law*, digunakan untuk memprediksi melebihi horizon prediksi sehingga menghasilkan *control signal sequences*. Diharapkan output dapat mengikuti referensi yang diberikan juga melakukan *noise cancelation* dan *online optimization*. Dalam tesis ini, NMPC diterapkan langsung pada model nonlinier tanpa melakukan linierisasi terlebih dahulu untuk mengatasi masalah *tracking control* dalam pengaturan kedalaman pada MARES AUV.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa implementasi NMPC yang diusulkan dapat menggiring error kedalaman menuju 0 di waktu ke 1200 detik, sehingga hal ini membuktikan bahwa NMPC secara efektif dapat digunakan pada model nonlinear dengan multi input dan multi output.

Kata Kunci : AUV, tracking control, sistem nonlinear, *MIMO system*, *Nonlinear Model Predictive Control*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND SIMULATION DEPTH CONTROL OF THE MARES AUV USING NMPC

By : Anindya Dwi Risdhayanti
Student Identity Number : 2214202004
Supervisor(s) : 1. Dr. Ir. Moch. Rameli
2. Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

ABSTRACT

Autonomous Underwater Vehicles (AUV) is a nonlinear system. Difficulties of control system design problems in underwater vehicles due to their nonlinear dynamics, indeterminate models, and the emergence of disturbances that are difficult to measure or estimate. The dynamics of control of the vehicle requires a guarantee of stability and consistent performance. The difficulty of control system design problem in AUV dynamics is the linear traditional design methodology can not be accommodated easily.

In this thesis, a nonlinear disturbance observer build derived from predictive control law model, used to predict over prediction horizon to produce control signal sequences in order to follow the reference that given, noise cancelation, and online optimization, so NMPC applied directly to nonlinear model without doing linearization in advance to solve the problem of tracking control in depth control on the MARES AUV.

The simulation results show that NMPC controllers herd the depth error to 0 at 1200 second so this approve that NMPC implementation can effectively be used on nonlinear models with multi input and multi output.

Keywords — AUV, tracking control, nonlinear system, MIMO system, Nonlinear Model Predictive Control

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, atas segala karunia dan ridho-NYA, sehingga tesis dengan judul “Desain dan Simulasi Gerak Kontrol Kedalaman pada MARES AUV menggunakan Nonlinear Model Predictive Control” ini dapat diselesaikan. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang Teknik Sistem Pengaturan pada Fakultas Teknologi Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Dalam penyelesaian tesis ini, penulis telah mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada kedua orang tua atas support dan doanya. Bapak Dr. Ir. Mochammad Rameli dan Bapak Ir. Rusdhianto Effendi AK.,MT. yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing sampai tesis ini selesai. Tak lupa penulis mengucapkan terimakasih kepada suami penulis, Mochammad Nur Handoyo atas dukungan dan doa juga segala yang telah diberikan dalam penyelesaian tesis ini.

Dengan keterbatasan pengalaman, ilmu maupun pustaka yang ditinjau, penulis menyadari bahwa tesis ini masih banyak kekurangan dan pengembangan lanjut agar benar benar bermanfaat. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran agar tesis ini lebih sempurna serta sebagai masukan bagi penulis untuk penelitian dan penulisan karya ilmiah di masa yang akan datang.

Akhir kata, penulis berharap tesis ini memberikan manfaat bagi kita semua terutama untuk pengembangan ilmu pengetahuan yang ramah lingkungan.

Surabaya, 9 Juni 2016

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Permasalahan	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Kontribusi	3
1.6 Metodologi	3
BAB 2 METODOLOGI PENELITIAN	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Kerangka Acuan	7
2.2.2 Transformasi Sudut Euler	9
2.2.3 Kinematika	10
2.2.4 Kinetika	11
2.2.5 Representasi <i>Body-Fixed</i>	18
2.2.6 Representasi <i>Earth-Fixed</i>	19
2.2.7 Model Enam Derajat Kebebasan	20
2.2.8 Mengabaikan Bagian Redaman Nonlinier dan Model Roll	23
2.2.9 MARES AUV	25
2.2.10 Model Predictive Control (MPC)	28
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM	35
3.1 Kontrol Kecepatan, Kedalaman, dan Pitch MARES AUV	35
3.2 Perancangan kontroler <i>NMPC</i>	37

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Persamaan Nonlinear Gerak MARES AUV	41
4.2 Desain Kontrol Kedalaman MARES AUV dengan metode NMPC	42
4.3 Simulasi dan Analisis Hasil Desain Kontrol MARES AUV.....	47
4.3.1 Simulasi Desain Plant MARES AUV Tanpa Kontrol.....	47
4.3.2 Simulasi desain Plant MARES AUV menggunakan NMPC	49
BAB 5 KESIMPULAN	53
DAFTAR PUSTAKA.....	55
LAMPIRAN	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kerangka Earth-centered Earth-fixed (ECEF) $x_e y_e z_e$ diputar dengan kecepatan sudut ω_e terhadap kerangka Earth-centered inertial (ECI) $x_i y_i z_i$. [10]....	7
Gambar 2.2 Koordinat Earth-fixed dan body-fixed [7]	9
Gambar 2.3 Rotasi Euler Angle (konvensi zyx). Kapal selam berotasi dari $\{n\}$ ke $\{b\}$ menggunakan tiga prinsip rotasi [10].....	10
Gambar 2.4 Titik Referensi <i>Body-fixed</i> [10].....	12
Gambar 2.5 Variabel gerakan untuk kapal laut yang bergerak dalam bidang horizontal. [4].....	20
Gambar 2.6 Variabel gerakan kapal selam [10].....	24
Gambar 2.7 Proyeksi Vertikal MARES [1]	25
Gambar 2.8 Proyeksi Lateral MARES [1]	26
Gambar 2.9 Prinsip Model Predictive Control.....	28
Gambar 2.10 Ilustrasi NMPC saat waktu t_n	29
Gambar 3.1 Koordinat BFF dan EFF pada model longitudinal [1]	35
Gambar 3.2 Diagram Blok Keseluruhan Sistem	37
Gambar 3.3 <i>NMPC control loop</i>	37
Gambar 4.1 Flowchart program NMPC pada Matlab	46
Gambar 4.2a Kecepatan Gerak Surge Tanpa Kontrol.....	47
Gambar 4.3a. Kecepatan Gerak Heave Tanpa Kontrol.....	48
Gambar 4.4a Kecepatan Gerak Pitch Tanpa Kontrol.....	49
Gambar 4.5 Nilai estimasi suboptimalitas sepanjang trayektori.....	50
Gambar 4.6 Kecepatan Gerak Surge menggunakan NMPC	50
Gambar 4.7a. Kecepatan Gerak Heave menggunakan NMPC	51
Gambar 4.8a. Kecepatan Gerak Pitch menggunakan NMPC	51

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Notasi SNAME (1950) untuk kapal laut.....	8
Tabel 2.2 Karakteristik MARES	26

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Permasalahan

Hampir semua plant yang ada saat ini merupakan sistem nonlinier. Stabilitas pada sistem nonlinier adalah salah satu masalah yang dapat diselesaikan untuk membuat sistem terkontrol. Nonlinieritas memberikan efek yang tidak diinginkan pada sistem. Maka, diperlukan desain kontroler untuk sistem nonlinier yang memiliki kemampuan untuk mengkompensasi efek tersebut [3].

Pada penelitian sebelumnya, dituliskan bahwa untuk menjaga kedalaman dilakukan dengan semakin memperlambat gerak pitch. Jika kecepatan aktual dalam *flight mode* pada AUV dikurangi dengan kecepatan minimum, maka AUV tidak dapat mengendalikan diri. Untuk mengatasi hal tersebut dibutuhkan desain AUV dengan menambahkan sayap tetap (*fixed wings*) [2]. Namun kendala dalam menggunakan sayap tetap adalah besarnya hambatan yang akan diterima oleh AUV.

Kesulitan masalah desain sistem kontrol pada *underwater vehicles* dikarenakan dinamika nonlinier-nya, model tak tentu, dan kemunculan disturbance yang susah untuk diukur atau diestimasi. Dinamika kontrol dari *vehicle* membutuhkan jaminan kestabilan dan tampil secara konsisten. Kesulitan masalah desain sistem kontrol pada dinamika AUV adalah metodologi desain tradisional linier tidak dapat diakomodasi secara mudah. Dinamika secara mendasar adalah nonlinier dalam kenyataannya. Koefisien hidrodinamik biasanya jarang diketahui, dan variasi dari disturbances tak terukur muncul disebabkan oleh arus [2]. Penelitian yang berjudul “Fault Tolerant Depth Control of the MARES AUV” mengambil model nonlinier dari dinamika MARES AUV yang diidentifikasi parameternya dengan menggunakan *an augmented Kalman filter*. Tujuan dari penelitian ini adalah menggiring error kedalaman menuju ke nol, namun simulasi pengaturan kedalaman pada saat operasi normal menunjukkan respon yang tidak stabil.

Dari beberapa penelitian tersebut terdapat kelemahan yaitu plant nonlinier dilinierisasikan sehingga menyebabkan sempitnya daerah kerja. Munculnya *disturbances* tak terukur yang disebabkan oleh arus dapat mempengaruhi performa dari sistem pada AUV. Pengaturan kedalaman pada MARES AUV tidak mengikuti referensi yang diberikan dan sudut pitch tidak stabil.

Penelitian mengenai pengaturan plant nonlinier menggunakan Nonlinear Model Predictive Control dilakukan oleh Ilmiyah Elrosa Citra Resmi. Dua bagian penting dalam penelitian ini yaitu menyederhanakan model nonlinear sebagai model linier dengan Takagi Sugeno models, yang kedua mendesain MPC pada model linier dan mengkombinasikan semua kontroler linier dengan fuzzy blending serta menerapkan kontroler tersebut pada model nonlinier [3].

Banyak penelitian dari MPC berdasarkan model linier dan hanya perilaku sistem dapat diprediksi lebih dari horizon yang diberikan. Pada kasus ini, MPC biasanya menghasilkan performa control yang buruk untuk proses-proses nonlinier tinggi karena error pemodelan yang cukup besar disebabkan oleh model linier yang terprediksi. Tujuan dari MPC adalah menentukan sinyal kontrol $u(t)$ melalui optimisasi online untuk membuat output dari sistem $y(t)$ mengikuti referensi $r(t)$ sedekat mungkin. Penelitian yang berjudul “Nonlinear Model Predictive Control for Induction Motor Drive” menunjukkan diaplikasikan nonlinear PID model predictive controller pada drive motor induksi, dimana torsi beban dianggap sebagai *unknown disturbance*. Observer torsi beban didapatkan dari *model predictive control law* dan terintegrasi dalam strategi control sebagai kontroler kecepatan PID. Penelitian ini menggunakan nonlinear state observer kontinyu berdasarkan error pengamatan dan kontroler dianalisa, dimana stabilitas global dari keseluruhan sistem [17].

Pada penelitian ini akan dibangun *nonlinear disturbance observer* yang didapatkan dari *model predictive control law*, memprediksi $u(t)$ melebihi horizon prediksi sehingga menghasilkan *control signal sequences* agar $y(t)$ dapat mengikuti $r(t)$ juga melakukan *noise cancelation* dan melakukan *online optimization*, sehingga NMPC diterapkan langsung pada model nonlinier tanpa

melakukan linierisasi terlebih dahulu untuk mengatasi masalah *tracking control* dalam pengaturan kedalaman pada MARES AUV.

1.2 Rumusan Masalah

Pengaturan kedalaman pada AUV dilakukan melalui pengaturan sudut pitch AUV. Permasalahan dalam penelitian ini adalah AUV memiliki dinamika nonlinier, model tak tentu, dan kemunculan *disturbances* yang susah untuk diukur atau diestimasi. Saat kecepatan rendah, pengaturan kedalaman dan sudut pitch pada AUV mengalami ketidakstabilan dan tidak mengikuti referensi yang diberikan.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini akan dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut,

1. Penelitian ini menggunakan model plant nonlinier dari MARES AUV.
2. Penelitian ini dilakukan dalam bentuk simulasi.
3. Penelitian ini hanya membahas pengaturan pada gerak MARES AUV.

1.4 Tujuan

Tujuan dari pembuatan thesis ini adalah menggiring error kedalaman menjadi 0 dan menunjukkan bahwa NMPC dapat digunakan pada model nonlinier dengan multi input dan multi output.

1.5 Kontribusi

Kontribusi yang diberikan dalam penelitian ini adalah aplikasi Nonlinear Model Predictive Controller (NMPC) untuk pengaturan kedalaman pada MARES AUV, dimana sudut pitch dianggap sebagai *unknown disturbance*. Observer sudut pitch ini terintegrasi ke dalam *model predictive controller* untuk mendesain NMPC yang dapat meningkatkan performa sistem.

1.6 Metodologi

Berikut merupakan metodologi yang digunakan agar penelitian dapat mencapai tujuan yang diharapkan. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap seperti dibawah ini:

1. Studi literatur

Materi yang diperlukan meliputi konsep tentang dinamika dan kinematika MARES AUV, pemrograman Matlab dan Simulink, dan desain NMPC.

2. Pemodelan sistem

Pemodelan sistem pada MARES AUV direduksi sehingga menghasilkan model sistem dalam *vertical plane* yang diperlukan dalam pengaturan kedalaman MARES AUV.

3. Perancangan sistem

Berdasarkan model pada *vertical plane* MARES AUV, diestimasi state sudut pitch untuk difeedbackkan ke *nonlinear optimizer* pada NMPC dan digunakan untuk memprediksi $u(t)$ melebihi horizon prediksi sehingga menghasilkan *control signal sequences* pada pengaturan kedalaman MARES AUV. Desain kontrol sistem dilakukan melalui software Matlab – Simulink.

4. Pengujian dan analisis hasil pengujian

Desain metode kontrol yang diterapkan pada plant akan diuji melaluisimulasi, dan memberikan beberapa kondisi pengujian, yaitu padakondisi ideal dan kondisi dengan pengaruh gangguan. Analisa hasil pengujian dilakukan untuk mengetahui performa sistem secara keseluruhan.

5. Kesimpulan

Kesimpulan diperoleh sesuai dengan hasil pengujian dan analisis hasil pengujian.

6. Penulisan Laporan Tesis

Penulisan laporan tesis dilakukan sebagai dokumentasi dari hasil penelitian yang dilakukan.

BAB 2

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Kajian Pustaka

Terdapat beberapa penelitian yang telah mengkaji tentang AUV, khususnya dalam hal pengaturan gerak. Dalam penelitian J. Liu, M.E. Furlong, A. Palmer, A.B. Philips, S.B. Turnock, dan S. M. Sharkh yang berjudul “*Design and Control of a Flight-Style AUV with hovering capability*” [2], dirancang mekanik dari Delphin AUV dan kontrol gerakannya. Penelitian pada Delphin AUV fokus pada penelitian sistem kontrol kecepatan rendah untuk melayang dan manuver. Terdapat kontroler primer *low-level*, yaitu kontroler kecepatan rendah vertikal, kontroler kecepatan rendah horizontal, dan kontroler kecepatan maju. Untuk kontrol kecepatan rendah vertikal, pengaturan *pitch* dan *depth* adalah *coupled*. Kontroler kedalaman untuk kecepatan rendah menggunakan kontroler PI dan hasil simulasi menunjukkan pada kontrol kedalaman, kedalaman AUV mengikuti referensi kedalaman yang diberikan, sedangkan untuk kontrol pada *pitch*, *pitch* AUV tidak mengikuti referensi yang diberikan. Untuk kontrol kecepatan rendah horizontal atau heading controller menggunakan kontroler Proportional, dan hasil dari simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa dengan menggunakan kontroler proporsional, respon dari heading memiliki overshoot yang cukup tinggi dan lebih lambat dari heading yang diinginkan. Dari penelitian ini, digunakan sebagai referensi perhitungan pengaturan kedalaman pada AUV.

Penelitian AUV berikutnya yang dilakukan oleh Bruno Ferreira, Anibal Matos, dan Nuno Cruz dengan judul “*Fault Tolerant Depth Control of the MARES AUV*” [3]. Pada penelitian ini, mengimplementasikan *augmented state extended Kalman filter* (ASEKF) untuk mengestimasi efektifitas *control commands*, mendeteksi dan mengidentifikasi kesalahan yang mungkin. Dalam penelitian ini, digunakan dua hukum kontrol untuk mengarahkan error kedalaman AUV menuju nol. Teori Lyapunov yang diadaptasi dalam [2] digunakan untuk mencapai hasil yang diinginkan. Dilakukan simulasi dari hukum kontrol untuk kemudian dilakukan eksperimen secara riil. Hasil pengaturan kedalaman dalam operasi normal,

menunjukkan ketidakstabilan pada respon kedalaman, sudut pitch dari plant juga tidak mencapai nilai *steady state* dan *overshoot* yang cukup besar.

Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) diaplikasikan pada *induction motor drive* dalam penelitian yang dilakukan oleh Adel Merabet berjudul “Nonlinear Model Predictive Control for Induction Motor Drive” [17]. Penelitian ini menampilkan aplikasi nonlinear PID model predictive control (NMPC PID) untuk drive motor induksi, dimana torsi beban dianggap sebagai *disturbance* yang tidak diketahui. Observer torsi beban didapatkan dari *model predictive control law* dan terintegrasi dalam strategi control kontroler kecepatan PID. Pertama, *nonlinear model predictive control law* telah dilakukan dari nonlinear state model dengan meminimalkan *cost function*.

Penelitian menggunakan NMPC juga dilakukan oleh Ilmiyah Elrosa Citra Resmi yang berjudul “Nonlinear Model Predictive Control of Nonlinear Systems Based on Takagi-Sugeno Models” [1]. Penelitian ini membuktikan bahwa NMPC dikombinasikan dengan T-S models untuk mendapatkan kontroler linier yang dapat digunakan untuk mengatur plant nonlinier yang berupa inverted pendulum. Terdapat dua bagian pening dalam penelitian ini, pertama nonlinier model dari plant dilinierisasi menggunakan T-S model, kedua kontroler MPC linier dikombinasikan dengan *fuzzy blending* dan diaplikasikan pada model nonlinier. Hasil respon menunjukkan, dari beberapa kondisi inisialisasi pada daerah kerja, NMPC dapat membawa sistem yang tidak stabil kembali ke origin, meski rise time lebih lambat daripada fuzzy PDC dan infinite horizon NMPC. Performa NMPC menunjukkan hasil yang baik untuk dibandingkan dengan fuzzy PDC dan infinite horizon NMPC, karena dapat menolak *disturbance* dari dalam dan luar sistem. Penulis dari penelitian ini menyarankan beberapa *future works*, diantaranya mengaplikasikan metode ini ke sistem nonlinier dengan *multiple inputs* dan *multiple outputs*, *uncertainties*, atau sistem dengan waktu tunda, membangun metode NMPC dengan menambahkan *input-output constraints* dan *system observer* untuk membuat metode ini dapat diaplikasikan pada plant *real time*, dan mengimplementasikan kontroler ini pada sistem riil untuk memvalidasi sistem terkontrol.

Dalam penelitian ini, akan digunakan model dinamika dari plant MARES AUV [3] untuk mendukung pengaturan kedalaman dan sudut pitch, juga akan

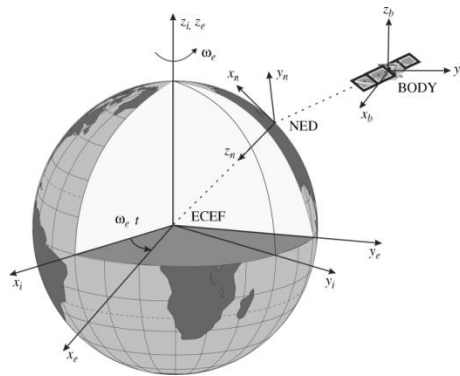
dikembangkan dengan mendesain kontroler NMPC yang menggunakan *nonlinear optimizer*, sehingga tidak diperlukan untuk melinierisasi model plant terlebih dahulu sebelum kontroler diterapkan.

2.2 Dasar Teori

Pada penelitian ini akan dipelajari dinamika dan kinematika dari plant AUV dan teori tentang Model Predictive Control.

2.2.1 Kerangka Acuan

Ketika menganalisa gerakan kapal laut dalam 6 DOF, didefinisikan dua kerangka koordinat terpusat-Bumi seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kerangka Earth-centered Earth-fixed (ECEF) x_e, y_e, z_e diputar dengan kecepatan sudut ω_e terhadap kerangka Earth-centered inertial (ECI) x_i, y_i, z_i . [10]

ECI adalah kerangka *Earth-centered inertial* (ECI), $\{i\} = (x_i, y_i, z_i)$ adalah kerangka inertial untuk navigasi terrestrial, yaitu kerangka acuan tanpa akselerasi yang memakai hukum gerakan Newton. ECEF adalah kerangka *Earth-centered Earth-fixed* (ECEF), $\{e\} = (x_e, y_e, z_e)$ memiliki titik pusat o_e tetap di pusat bumi tetapi sumbu berputar relatif untuk bingkai inertial ECI. NED adalah sistem koordinat *North-East-Down* (NED), $\{n\} = (x_n, y_n, z_n)$ dengan titik pusat o_n pada permukaan bumi. Ini adalah sistem koordinat yang mengacu pada kehidupan sehari-hari. BODY adalah *body-fixed reference* $\{b\} = (x_b, y_b, z_b)$ dengan titik pusat o_b yang tetap pada kapal. Posisi dan orientasi kapal diuraikan relative untuk kerangka *inertial reference* ($\{e\}$ atau $\{n\}$), sedang kecepatan linier dan sudut dari kapal dinyatakan dalam sistem koordinat *body-fixed*.

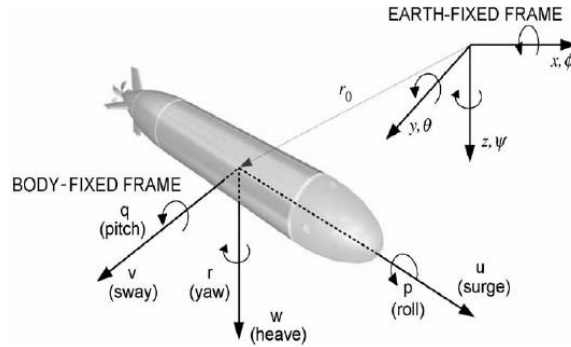
Untuk menentukan persamaan gerak, diperlukan dua kerangka acuan, yaitu kerangka inersial atau *earth-fixed* yang diambil bertepatan dengan koordinat tetap kapal dalam beberapa kondisi awal dan kerangka *body-fixed*. Karena gerakan bumi sangat mempengaruhi kapal laut, maka kerangka *earth-fixed* bisa dianggap inersial. Secara umum untuk kapal laut, posisi diadopsi untuk kerangka *body-fixed* yang memberikan kapal simetri terhadap bidang- $O_bX_bZ_b$ dan tafsiran simetri terhadap bidang- $O_bY_bZ_b$. Untuk itu, sumbu benda O_bX_b , O_bY_b dan O_bZ_b bertepatan dengan sumbu prinsipal inersia dan didefinisikan sebagai berikut:

- x_b - untuk sumbu longitudinal (diarahkan dari buritan ke depan);
- y_b - ialah sumbu transversal (diarahkan untuk *starboard*); dan
- z_b - adalah sumbu normal (diarahkan dari atas ke dasar).

Pemodelan kapal laut biasanya didasarkan pada mekanika, prinsip-prinsip statika dan dinamika. Statika berkaitan dengan kesetimbangan benda (*body*) yang diam atau bergerak dengan kecepatan konstan. Dinamika berkenaan dengan *body* yang memiliki percepatan gerak akibat dari gangguan dan/atau gaya kendali. Sifat-sifat fisik dan kendali dari model juga dinyatakan untuk desain kendali dan analisis kestabilan. Saat ini digunakan notasi SNAME (*Society of Naval Architects and Marine Engineers*) yang dijelaskan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Notasi SNAME (1950) untuk kapal laut

DOF		Gaya dan Momen	Kecepatan linier dan sudut	Posisi dan sudut Euler
1	Gerakan searah sumbu- x (<i>surge</i>)	X	u	x
2	Gerakan searah sumbu- y (<i>sway</i>)	Y	v	y
3	Gerakan searah sumbu- z (<i>heave</i>)	Z	w	z
4	Rotasi di sumbu- x (<i>roll, heel</i>)	K	p	ϕ
5	Rotasi di sumbu- y (<i>pitch, trim</i>)	M	q	θ
6	Rotasi di sumbu- z (<i>yaw</i>)	N	r	ψ



Gambar 2.2 Koordinat Earth-fixed dan body-fixed [7]

Pada sebuah kapal laut yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 bergerak dalam enam derajat kebebasan, maka dibutuhkan enam koordinat independen untuk menentukan posisi dan orientasi. Tiga koordinat pertama (x, y, z) dan turunan waktu pertamanya bersesuaian dengan posisi dan gerakan translasi sepanjang sumbu x, y dan z , sedang tiga koordinat lainnya (ϕ, θ, ψ) dan turunan waktu pertamanya menguraikan orientasi dan gerakan memutar.

Gerakan kapal laut secara umum bisa diuraikan dengan vektor berikut:

$$\text{Posisi NED:} \quad \boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_1 \boldsymbol{\eta}_2]^T, \quad \boldsymbol{\eta}_1 = [x \ y \ z]^T, \quad \boldsymbol{\eta}_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T$$

$$\text{Kecepatan linier } \textit{Body-fixed}: \quad \mathbf{v} = [v_1 v_2]^T, \quad v_1 = [u \ v \ w]^T, \quad v_2 = [p \ q \ r]^T$$

$$\text{Gaya } \textit{Body-fixed}: \quad \boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_1 \boldsymbol{\tau}_2]^T, \quad \boldsymbol{\tau}_1 = [X \ Y \ Z]^T, \quad \boldsymbol{\tau}_2 = [K \ M \ N]^T$$

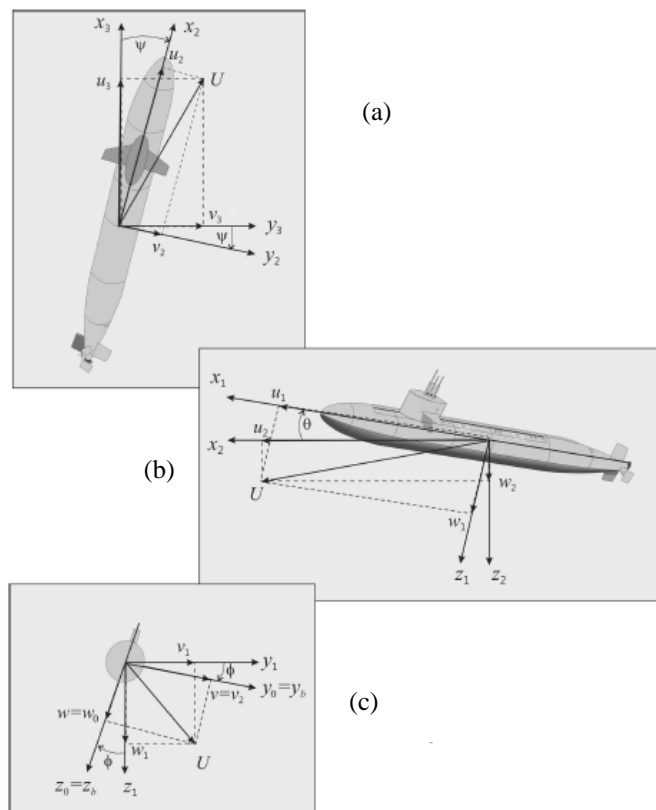
Dengan $\boldsymbol{\eta}$ menyatakan vektor posisi, $\boldsymbol{\eta}_1$, dan orientasi (sudut Euler), $\boldsymbol{\eta}_2$, dengan koordinat dalam bingkai *earth-fixed*, \mathbf{v} menyatakan vektor kecepatan linier, v_1 , dan sudut, v_2 , dengan koordinat dalam bingkai *body-fixed*, dan $\boldsymbol{\tau}$ menyatakan aksi gaya, $\boldsymbol{\tau}_1$, dan momen, $\boldsymbol{\tau}_2$, pada kapal dalam bingkai *body-fixed*.

Untuk menurunkan persamaan gerak kapal laut, perlu diketahui dinamika kapal laut yang dibagi menjadi dua bagian, yaitu *kinematika* yang hanya membicarakan aspek geometri gerakan, dan *kinetika* yang menganalisis gaya-gaya yang menghasilkan gerakan.

2.2.2 Transformasi Sudut Euler

Transformasi sudut Euler pada kapal selam ditunjukkan pada Gambar 2.3. Pada Gambar 2.3 (a) menunjukkan rotasi pada sumbu- z (sudut ψ) dimana $w_3 = w_2$

, Gambar 2.3 (b) menunjukkan rotasi pada sumbu-y (sudut θ) dimana $v_2 = v_1$, dan Gambar 2.33 (c) menunjukkan rotasi pada sumbu-x (sudut ϕ) dimana $u_1 = u$.



Gambar 2.3 Rotasi Euler Angle (konvensi zyx). Kapal selam berotasi dari $\{n\}$ ke $\{b\}$ menggunakan tiga prinsip rotasi [10]

2.2.3 Kinematika

Turunan waktu pertama dari vector posisi η_1 dikaitkan dengan vector kecepatan linier v_1 melalui transformasi berikut:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad (2.1)$$

Dengan $J_1(\eta_2)$ ialah matriks transformasi, merupakan fungsi dari sudut: *roll* (ϕ), *pitch* (θ), dan *yaw* (ψ). Matriks ini diberikan dengan

$$\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cos(\theta) & -\sin(\psi) \cos(\phi) + \sin(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) \\ \sin(\psi) \cos(\theta) & \cos(\psi) \cos(\phi) + \sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) \\ -\sin(\theta) & \sin(\phi) \cos(\theta) \\ & \sin(\psi) \sin(\phi) + \sin(\theta) \cos(\psi) \cos(\phi) \\ & -\cos(\psi) \sin(\phi) + \sin(\theta) \sin(\psi) \cos(\phi) \\ & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Secara global, $\mathbf{v}_1 = \mathbf{J}_1^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = \mathbf{J}_1^T(\boldsymbol{\eta}_2) \dot{\boldsymbol{\eta}}_1$

Turunan waktu pertamanya dari vektor sudut Euler $\boldsymbol{\eta}_2$ dikaitkan dengan vektor kecepatan *body-fixed* \mathbf{v}_2 melalui transformasi:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_2 = \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \mathbf{v}_2 \quad (2.3)$$

Dengan matriks transformasi $\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2)$ ialah

$$\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi)/\cos(\theta) & \cos(\phi)/\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Matriks transformasi $\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2)$ singular pada sudut *pitch* $\theta = \pm 90^\circ$.

Gabungan persamaan (2.1) dan (2.3) menghasilkan kinematika kapal laut sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v}. \quad (2.5)$$

2.2.4 Kinetika

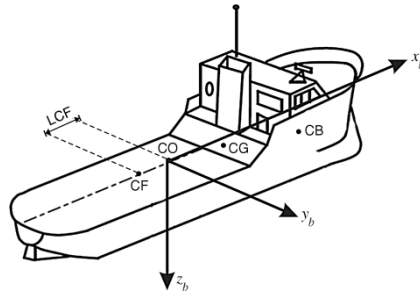
Untuk menurunkan persamaan gerak kapal laut, maka perlu untuk mempelajari gerakan benda-tegar, hidrodinamik, dan hidrostatik.

2.2.4.1 Persamaan Gerak Benda-Tegar

Persamaan gerak bisa dinyatakan dalam dua titik referensi *body-fixed*: CO – titik pusat dari $\{b\}$ dan CG – pusat gravitasi. Titik CO biasanya digunakan untuk merancang pedoman, navigasi dan sistem kendali. Untuk kapal laut, titik ini terletak

di tengah-tengah kapal, sedangkan titik CG tergantung pada kondisi beban. Mari kita definisikan vektor-vektor berikut:

- $\mathbf{f}_{0b} = [X \ Y \ Z]^T$: gaya yang disusun dalam bingkai *body-fixed*.
- $\mathbf{m}_{0b} = [K \ M \ N]^T$: momen yang disusun dalam bingkai *body-fixed*.
- $\mathbf{v}_{0b} = [u \ v \ w]^T$: kecepatan linier disusun dalam bingkai *body-fixed*.
- $\boldsymbol{\omega}_{0b}^E = [p \ q \ r]^T$: kecepatan sudut dari bingkai *body-fixed* terhadap bingkai *earth-fixed*.
- $\mathbf{r}_{0b} = [x_g \ y_g \ z_g]^T$: vector dari $\mathbf{0}_b$ ke CG (pusat gravitasi kapal) disusun dalam bingkai *body-fixed*.



Gambar 2.4 Titik Referensi *Body-fixed* [10]

Dengan rumus Newton-Euler untuk benda tegar dengan massa m , kita memiliki keseimbangan gaya dan momen berikut:

$$\begin{aligned} m[\dot{\mathbf{v}}_{0b} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{0b}^E \times \mathbf{r}_{0b} + \boldsymbol{\omega}_{0b}^E \times \mathbf{v}_{0b} + \boldsymbol{\omega}_{0b}^E \times (\boldsymbol{\omega}_{0b}^E \times \mathbf{r}_{0b})] &= \mathbf{f}_{0b} \\ \mathbf{I}_0 \dot{\boldsymbol{\omega}}_{0b}^E + \boldsymbol{\omega}_{0b}^E \times \mathbf{I}_0 \boldsymbol{\omega}_{0b}^E + m \mathbf{r}_{0b} \times (\dot{\mathbf{v}}_{0b} + \boldsymbol{\omega}_{0b}^E \times \mathbf{v}_{0b}) &= \mathbf{m}_{0b} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dengan \mathbf{I}_0 ialah matriks inersia terhadap $\mathbf{0}_b$ didefinisikan dengan

$$\mathbf{I}_0 = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

I_x , I_y , dan I_z adalah momen inersia terhadap sumbu $0_b X_b$, $0_b Y_b$, dan $0_b Z_b$, dan perkalian inersia $I_{xy} = I_{yx}$, $I_{xz} = I_{zx}$, dan $I_{yz} = I_{zy}$.

$$\begin{aligned}
I_x &= \int_v (y^2 + z^2) \rho_m dV, & I_{xy} &= \int_v xy \rho_m dV \\
I_y &= \int_v (x^2 + z^2) \rho_m dV, & I_{xz} &= \int_v xz \rho_m dV \\
I_z &= \int_v (x^2 + y^2) \rho_m dV, & I_{zy} &= \int_v zy \rho_m dV
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Dengan ρ_m dan V adalah kerapatan massa dan volume dari benda tegar. Substitusi dari f_{0b} , m_{0b} , v_{0b} , ω_{0b}^E dan r_{0b} ke dalam persamaan (2.6) menghasilkan persamaan gerak dari benda tegar:

$$\mathbf{M}_{RB} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_{RB} \tag{2.9}$$

Dimana $\mathbf{v} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ adalah vector kecepatan yang disusun dalam bingkai *body-fixed*, $\boldsymbol{\tau}_{RB} = [X \ Y \ Z \ K \ M \ N]^T$ adalah vektor gaya luar dan momen, matriks inersia sistem benda tegar \mathbf{M}_{RB} diberikan dengan

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & -my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mz_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

Dan matriks Coriolis dan sentripetal benda tegar, $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$ diberikan dengan

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_g q + z_g r) & m(y_g p + w) & m(z_g p - v) \\ m(x_g q - w) & -m(z_g r + x_g p) & m(z_g q + u) \\ m(x_g q + v) & m(y_g r - u) & -m(x_g p + y_g q) \\ m(y_g q + z_g r) & -m(x_g q - w) & -m(x_g r + v) \\ -m(y_g p + w) & m(z_g r + x_g p) & -m(y_g r - u) \\ -m(z_g p - v) & -m(z_g q + u) & m(x_g p + y_g q) \\ 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yx} r + I_{xy} p - I_y q \\ I_{yx} q + I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p \\ -I_{yx} r - I_{xy} p + I_y q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

Vektor gaya luar dan momen, $\boldsymbol{\tau}_{RB}$, adalah jumlah dari vektor gaya hidrodinamik dan momen $\boldsymbol{\tau}_H$, vector gaya gangguan luar dan momen $\boldsymbol{\tau}_E$, dan vector gaya dorong dan momen $\boldsymbol{\tau}$.

2.2.4.2 Gaya dan Momen Hidrodinamik

Gaya dan momen bisa diidentifikasi sebagai jumlah tiga komponen: (1) massa tambahan akibat inersia dari fluida sekitar, (2) redaman potensial radiasi-induksi akibat energy yang dibawa oleh gelombang permukaan yang ditimbulkan, dan (3) gaya restoring akibat dari gaya archimedes (bobot dan apung). Kontribusi dari ketiga komponen ini bisa dituliskan,

$$\boldsymbol{\tau}_R = -\underbrace{\mathbf{M}_A \dot{\mathbf{v}} - \mathbf{C}_A(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{massa tambahan}} - \underbrace{\mathbf{D}_P(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{redaman potensial}} - \underbrace{\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})}_{\text{gaya restoring}}$$

Kita perlu menyertakan pengaruh redaman lain seperti gesekan lambung, redaman pergeseran gelombang dan redaman akibat *vortex shedding*, yaitu

$$\boldsymbol{\tau}_D = -\underbrace{\mathbf{D}_S(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{gesekan lambung}} - \underbrace{\mathbf{D}_w(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{pergeseran gelombang}} - \underbrace{\mathbf{D}_M(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{vortex shedding}}$$

Vektor gaya dan momen hidrodinamik $\boldsymbol{\tau}_H = \boldsymbol{\tau}_R + \boldsymbol{\tau}_D$, adalah

$$\boldsymbol{\tau}_H = -\mathbf{M}_A \dot{\mathbf{v}} - \mathbf{C}_A(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) \quad (2.12)$$

Dimana \mathbf{M}_A adalah matriks massa tambahan, $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$ adalah matriks Coriolis hidrodinamik dan sentripetal, $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ adalah matriks redaman, dan $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ adalah posisi dan orientasi yang tergantung pada vektor gaya dan momen restoring. Matriks redaman hidrodinamik $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ didefinisikan sebagai:

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{D}_P(\mathbf{v}) + \mathbf{D}_S(\mathbf{v}) + \mathbf{D}_w(\mathbf{v}) + \mathbf{D}_M(\mathbf{v})$$

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Gaya massa tambahan hidrodinamik \mathbf{Y} sepanjang sumbu-y akibat percepatan \dot{u} di arah-x ditulis sebagai

$$\mathbf{Y} = -\mathbf{Y}_u \dot{u}, \quad \mathbf{Y}_u := \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \dot{u}} \quad (2.14)$$

Matriks Coriolis hidrodinamik dan sentripetal diberikan

$$\mathbf{C}_A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Dimana

$$a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r,$$

$$a_2 = Y_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r$$

$$a_3 = Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r$$

$$b_1 = K_{\dot{u}}u + K_{\dot{v}}v + K_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r$$

$$b_2 = M_{\dot{u}}u + M_{\dot{v}}v + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r$$

$$b_3 = N_{\dot{u}}u + N_{\dot{v}}v + N_{\dot{w}}w + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r \quad (2.16)$$

Secara umum, pergerakan pesawat selam dalam 6 DOF dengan kecepatan tinggi adalah nonlinier. Namun dalam beberapa aplikasi ROV, pesawat hanya diaplikasikan untuk bergerak pada kecepatan rendah. Jika pesawat juga memiliki tiga bidang simetri, maka

$$\mathbf{M}_A(\mathbf{v}) = -diag\{X_{\dot{u}} \quad Y_{\dot{v}} \quad Z_{\dot{w}} \quad K_{\dot{p}} \quad M_{\dot{q}} \quad N_{\dot{r}}\} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{C}_A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Struktur dengan unsur diagonal-off ditafsirkan melalui banyak aplikasi, karena sulit untuk menentukan dari percobaan dan juga teori.

2.2.4.3 Gaya dan Momen Restoring

Dalam terminologi hidrodinamik, gaya gravitasi dan gaya apung disebut gaya-gaya *restoring*. Tinjau m adalah massa kapal, ∇ adalah volume fluida yang dipindah oleh kapal laut, g adalah percepatan gravitasi (positif menurun), dan ρ kerapatan air. Bobot bodi yang terendam dan gaya apung (*buoyancy*) didefinisikan sebagai

$$\mathbf{W} = mg, \quad \mathbf{B} = \rho g \nabla \quad (2.19)$$

Dengan definisi ini, maka gaya restoring dan vektor momen $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ akibat gaya gravitasi dan apung, adalah

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin(\theta) \\ -(W - B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -(W - B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -(y_g W - y_b B) \cos(\theta) \cos(\phi) + (z_g W - z_b B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ (z_g W - z_b B) \sin(\theta) + (x_g W - x_b B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -(x_g W - x_b B) \cos(\theta) \sin(\phi) - (y_g W - y_b B) \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Dimana (x_b, y_b, z_b) menyatakan koordinat dari pusat apung (*buoyancy*). Untuk pesawat selam,

$$\mathbf{W}=\mathbf{B}$$

Jarak antara pusat gravitasi CG dan pusat apung CB didefinisikan dengan vector sebagai berikut

$$\mathbf{BG} = [\overline{BG}_x, \overline{BG}_y, \overline{BG}_z]^T = [x_g - x_b, y_g - y_b, z_g - z_b]^T$$

Oleh karena itu,

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\overline{BG}_y W \cos(\theta) \cos(\phi) + \overline{BG}_z W \cos(\theta) \sin(\phi) \\ \overline{BG}_z W \sin(\theta) + \overline{BG}_x W \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -\overline{BG}_x W \cos(\theta) \sin(\phi) - \overline{BG}_y W \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

Representasi sederhana bisa diperoleh ketika CG dan CB terletak vertikal pada sumbu- z , sehingga $x_b = x_g$ dan $y_g = y_b$, dengan demikian:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \overline{BG}_z W \cos \theta \sin \phi \quad \overline{BG}_z W \sin \theta \quad 0]^T$$

2.2.4.3 Gaya dan Momen Lingkungan

Vektor $\boldsymbol{\tau}_E$ dari gaya dan momen ditimbulkan oleh gangguan lingkungan termasuk arus laut, gelombang (yang dibangkitkan angin) dan angin, yaitu

$$\boldsymbol{\tau}_E = \boldsymbol{\tau}_E^{cu} + \boldsymbol{\tau}_E^{wa} + \boldsymbol{\tau}_E^{wi} \quad (2.21)$$

Dimana $\boldsymbol{\tau}_E^{cu}$, $\boldsymbol{\tau}_E^{wa}$ dan $\boldsymbol{\tau}_E^{wi}$ adalah vector-vektor gaya dan momen yang ditimbulkan oleh arus laut, gelombang dan angin.

2.2.4.4 Gaya dan Momen yang ditimbulkan Arus Laut

Vektor $\boldsymbol{\tau}_E^{cu}$ dari gaya dan momen yang ditimbulkan arus laut diberikan,

$$\boldsymbol{\tau}_E^{cu} = (\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A) \dot{\mathbf{v}}_c + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r - \mathbf{C}(\mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r - \mathbf{D}(\mathbf{v}) \mathbf{v} \quad (2.22)$$

dimana $\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c$ dan $\mathbf{v}_c = [u_c, v_c, w_c, 0, 0, 0]^T$ adalah vector kecepatan arus *body-fixed* bebas pusaran. Tinjau vektor kecepatan arus *earth-fixed* dinyatakan dengan $[u_c^E, v_c^E, w_c^E]^T$. Maka, komponen *body-fixed* $[u_c, v_c, w_c]^T$ bisa dihitung menggunakan matriks transformasi sudut Euler,

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \end{bmatrix} = \mathbf{J}_1^T(\boldsymbol{\eta}_2) \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \\ w_c^E \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

2.2.5 Representasi *Body-Fixed*

Substitusi $\boldsymbol{\tau}_{RB} = \boldsymbol{\tau}_H + \boldsymbol{\tau}_E + \boldsymbol{\tau}$ ke dalam persamaan (2.9) dan menggabungkan dengan persamaan (2.5) menghasilkan persamaan gerak kapal laut dalam enam derajat kebebasan seperti berikut:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \\ \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} &= -\mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_E \end{aligned} \quad (2.24)$$

Dimana

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A \\ \mathbf{C}(\mathbf{v}) &= \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Dengan anggapan bahwa benda diam (atau bergerak dengan kecepatan lambat) dalam fluida ideal, maka matriks \mathbf{M} selalu definit positif simetri, yaitu

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}^T > 0. \quad (2.26)$$

Untuk benda yang bergerak di fluida, matriks Coriolis dan sentripetal $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ selalu bisa diparameterisasi seperti skew-symmetric, yaitu

$$\mathbf{C}(\mathbf{v}) = -\mathbf{C}^T(\mathbf{v}), \quad \forall \mathbf{v} \in \mathfrak{R}^6 \quad (2.27)$$

Untuk benda tegar yang bergerak di fluida ideal, matriks redaman hidrodinamik $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ adalah real, non-symmetric dan positif, yaitu

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) > \mathbf{0}, \quad \forall \mathbf{v} \in \mathfrak{R}^6 \quad (2.28)$$

2.2.6 Representasi *Earth-Fixed*

Model matematika (2.24) juga bisa ditulis dengan menggunakan representasi koordinat *earth-fixed* dengan menerapkan transformasi kinematika berikut (dengan asumsi bahwa $\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})$ ada, yaitu $\theta \neq \pm \frac{\pi}{2}$):

$$\begin{aligned}\mathbf{v} &= \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}} \\ \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})[\ddot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}]\end{aligned}\quad (2.29)$$

substitusi persamaan (2.29) kedalam persamaan kedua (2.24) menghasilkan

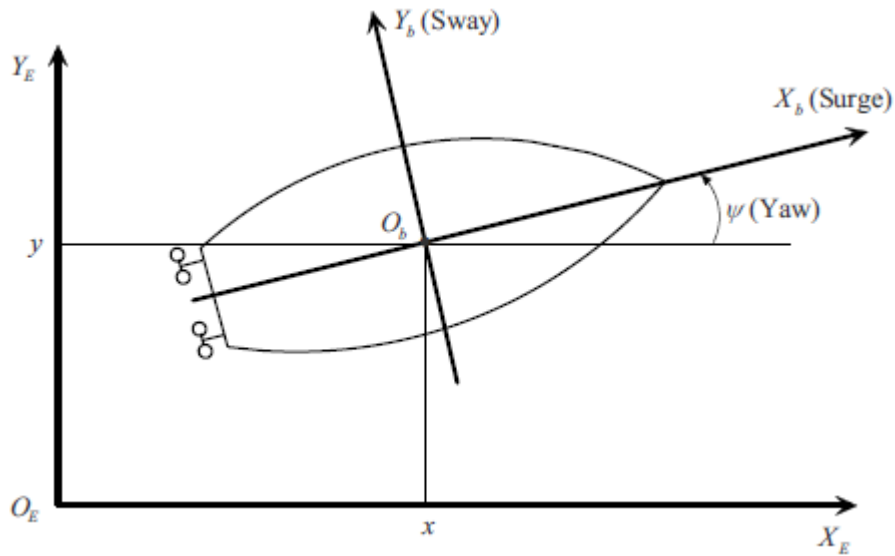
$$\mathbf{M}^*(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}} = -\mathbf{C}^*(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{D}^*(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{g}^*(\boldsymbol{\eta}) + \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\eta})(\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_E) \quad (2.30)$$

dimana

$$\begin{aligned}\mathbf{M}^*(\boldsymbol{\eta}) &= \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{M}\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \\ \mathbf{C}^*(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta}) &= \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\eta})[\mathbf{C}(\mathbf{v}) - \mathbf{M}\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta})]\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \\ \mathbf{D}^*(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta}) &= \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \\ \mathbf{g}^*(\boldsymbol{\eta}) &= \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})\end{aligned}\quad (2.31)$$

dengan asumsi yang sama dalam representasi *body-fixed*, model (2.30) menggunakan representasi *earth-fixed* memiliki sifat-sifat berikut:

$$\begin{aligned}\mathbf{M}^*(\boldsymbol{\eta}) &= \mathbf{M}^*(\boldsymbol{\eta})^T, \quad \forall \boldsymbol{\eta} \in \mathfrak{R}^6 \\ \mathbf{s}^T[\mathbf{M}^*(\boldsymbol{\eta}) - 2\mathbf{C}^*(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta})]\mathbf{s} &= \mathbf{0}, \quad \forall \boldsymbol{\eta} \in \mathfrak{R}^6, \mathbf{v} \in \mathfrak{R}^6, \mathbf{s} \in \mathfrak{R}^6 \\ \mathbf{D}^*(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta}) &> \mathbf{0}, \quad \forall \boldsymbol{\eta} \in \mathfrak{R}^6, \mathbf{v} \in \mathfrak{R}^6.\end{aligned}\quad (2.32)$$



Gambar 2.5 Variabel gerakan untuk kapal laut yang bergerak dalam bidang horizontal. [4]

2.2.7 Model Enam Derajat Kebebasan

Di bagian sebelumnya, diasumsikan bahwa pusat gravitasi dan pusat apungan ditempatkan secara vertical pada sumbu- $O_b Z_b$, dan tidak ada kopling (diagonal-off) di matriks M , D , dan $D_n(n)$.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1$$

$$M_1 \dot{v}_1 = -C_1(v_1)v_2 - D_1 v_1 - D_{n1}(v_1)v_1 + \tau_1 + \tau_{1E}$$

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2 \quad (2.33)$$

$$M_2 \dot{v}_2 = -C_1(v_1)v_1 - C_2(v_2)v_2 - D_2 v_2 - D_{n2}(v_2)v_2 - g_2(\eta_2) + \tau_2 + \tau_{2E}$$

Dimana $J_1(\eta_2)$ dan $J_2(\eta_2)$ diberikan dalam persamaan (2.3) dan (2.4). Matriks M_1 dan M_2 adalah

$$M_1 = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Dimana , $m_{11} = m - X_{\dot{u}}$, $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$

$m_{33} = m - Z_{\dot{w}}$, $m_{44} = m - K_{\dot{p}}$

$m_{55} = m - M_{\dot{q}}$, $m_{66} = m - N_{\dot{r}}$

Matriks $\mathbf{C}_1(\mathbf{v}_1)$ dan $\mathbf{C}_2(\mathbf{v}_2)$ adalah

$$\mathbf{C}_1(\mathbf{v}_1) = \begin{bmatrix} 0 & m_{33}w & -m_{22}v \\ -m_{33}w & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_2(\mathbf{v}_2) = \begin{bmatrix} 0 & m_{66}r & -m_{55}q \\ -m_{66}r & 0 & m_{44}p \\ m_{55}q & -m_{44}p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Matriks redaman linier \mathbf{D}_1 dan \mathbf{D}_2 adalah

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} d_{44} & 0 & 0 \\ 0 & d_{55} & 0 \\ 0 & 0 & d_{66} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Dimana, $d_{11} = -X_u$, $d_{22} = -Y_v$,

$d_{33} = -Z_w$, $d_{44} = -K_p$,

$d_{55} = -M_q$, $d_{66} = -N_r$,

Matriks redaman nonlinier $\mathbf{D}_{n1}(\mathbf{v}_1)$ dan $\mathbf{D}_{n2}(\mathbf{v}_2)$ adalah

$$\begin{aligned}
\mathbf{D}_{n_1}(\mathbf{v}_1) &= \begin{bmatrix} \sum_{i=2}^3 d_{ui} |u|^{i-1} & 0 & 0 \\ 0 & \sum_{i=2}^3 d_{vi} |v|^{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{i=2}^3 d_{wi} |w|^{i-1} \end{bmatrix} \\
\mathbf{D}_{n_2}(\mathbf{v}_2) &= \begin{bmatrix} \sum_{i=2}^3 d_{pi} |p|^{i-1} & 0 & 0 \\ 0 & \sum_{i=2}^3 d_{qi} |q|^{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{i=2}^3 d_{ri} |r|^{i-1} \end{bmatrix} \quad (2.37)
\end{aligned}$$

Dimana d_{ui} , d_{vi} , d_{wi} , d_{pi} , d_{qi} , dan d_{ri} dengan $i = 2, 3$ adalah koefisien redaman hidrodinamik nonlinier. Vektor gaya dan momen restoring $\mathbf{g}_2(\boldsymbol{\eta}_2)$ diberikan dengan

$$\mathbf{g}_2(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} \rho g \nabla \overline{GM}_T \sin(\phi) \cos(\theta) \\ \rho g \nabla \overline{GM}_L \sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Dimana ρ , g , ∇ , \overline{GM}_T dan \overline{GM}_L adalah kerapatan air, percepatan gravitasi, perpindahan volume air, tinggi *transverse metacentric* dan tinggi *longitudinal metacentric*.

Vektor gaya dan momen pendorong $\boldsymbol{\tau}_1$ dan $\boldsymbol{\tau}_2$ adalah

$$\boldsymbol{\tau}_1 = \begin{bmatrix} \tau_u \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\tau}_2 = \begin{bmatrix} \tau_p \\ \tau_q \\ \tau_r \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

yang secara tidak langsung menyatakan bahwa kapal laut tidak memiliki *actuator independent* dalam *sway* dan *heave*.

Vektor gangguan lingkungan $\boldsymbol{\tau}_E$ dan $\boldsymbol{\tau}_{E_2}$ diberikan dengan

$$\boldsymbol{\tau}_{1E} = \begin{bmatrix} \tau_{Eu} \\ \tau_{Ev} \\ \tau_{Ew} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\tau}_{2E} = \begin{bmatrix} \tau_{Ep} \\ \tau_{Eq} \\ \tau_{Er} \end{bmatrix}, \quad (2.40)$$

Dimana τ_{Eu} , τ_{Ev} , τ_{Ew} , τ_{Ep} , τ_{Eq} , dan τ_{Er} adalah gaya atau momen gangguan lingkungan yang bekerja pada sumbu *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*.

2.2.8 Mengabaikan Bagian Redaman Nonlinier dan Model Roll

Banyak penelitian yang telah dilakukan mengabaikan bagian redaman hidrodinamik nonlinier dan *roll*, serta gangguan lingkungan. Ini terutama untuk kapal yang beroperasi pada kecepatan rendah dan dilengkapi dengan aktuator roll internal/eksternal independent. Dengan demikian model (2.33) disederhanakan menjadi kinematika dan kinetika berikut ini,

1. Kinematika

$$\dot{x} = \cos(\psi) \cos(\theta) u - \sin(\psi) v + \sin(\theta) \cos(\psi) w,$$

$$\dot{y} = \sin(\psi) \cos(\theta) u + \cos(\psi) v + \sin(\theta) \sin(\psi) w,$$

$$\dot{z} = -\sin(\theta) u + \cos(\theta) w,$$

$$\dot{\theta} = q,$$

$$\dot{\psi} = \frac{r}{\cos(\theta)} \quad (2.41)$$

2. Kinetika

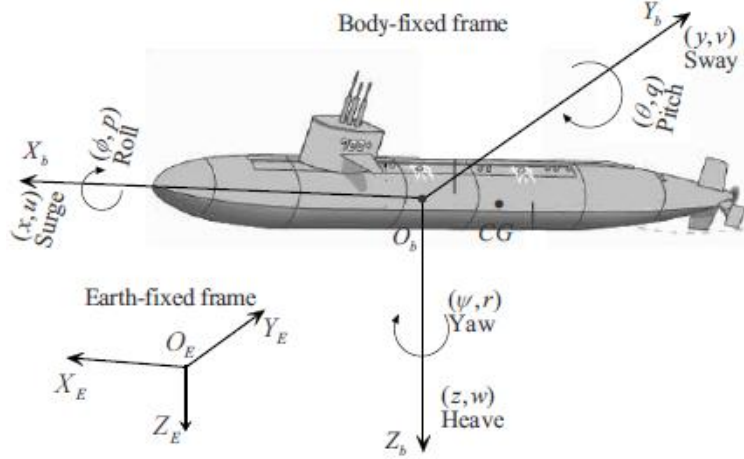
$$\dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{m_{33}}{m_{11}} wq - \frac{d_{11}}{m_{11}} u + \frac{1}{m_{11}} \tau_u$$

$$\dot{v} = \frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{d_{22}}{m_{22}} v$$

$$\dot{w} = \frac{m_{11}}{m_{33}} uq - \frac{d_{33}}{m_{33}} w$$

$$\dot{q} = \frac{m_{33} - m_{11}}{m_{55}} uw - \frac{d_{55}}{m_{55}} q - \frac{\rho g \nabla GM_L \sin(\theta)}{m_{55}} + \frac{1}{m_{55}} \tau_q$$

$$\dot{r} = \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{66}} uv - \frac{d_{66}}{m_{66}} r + \frac{1}{m_{66}} \tau_r \quad (2.42)$$



Gambar 2.6 Variabel gerakan kapal selam [10]

Simbol-simbol pada Gambar 2.8, θ , ψ , q , dan r menyatakan sudut dan kecepatan *roll*, *pitch*, dan *yaw* sedang x , y , z , u , v dan w adalah pergeseran dan kecepatan *surge*, *sway*, dan *heave*. Masukan kendali yang tersedia adalah τ_u , τ_q , dan τ_r . Karena gaya kendali *sway* dan *heave* tidak ada dalam dinamika *sway* dan *heave*, maka pesawat selam tersebut *underactuated*. Persamaan (2.41) tidak didefinisikan ketika sudut *pitch* sama dengan $\pm 90^\circ$. Namun demikian selama operasi praktis, masalah ini mau tidak mau terjadi akibat gaya metacentric restoring. Salah satu cara untuk menghindari singularity ialah menggunakan deskripsi empat parameter yang dikenal sebagai quaternion. Di sini, kita menggunakan parameter Euler di atas karena representasi fisiknya dan efisiensi komputasi. Kita asumsikan bahwa $|\theta(t_0)| < 0,5\pi$. Maka kita dapatkan kondisi awal yang bisa diterima seperti jaminan pengendali yang diusulkan $|\theta(t)| = 0,5\pi, \forall t \geq t_0 \geq 0$.

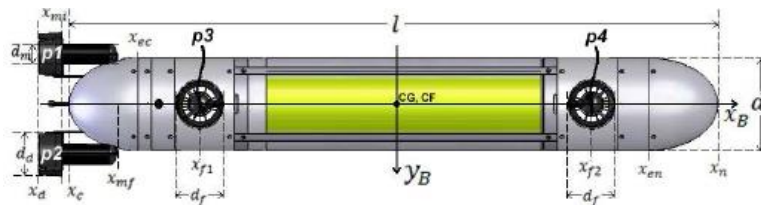
Dianggap tujuan kendali dari masukan kendali τ_u , τ_q , dan τ_r untuk gaya pesawat selam diberikan dalam persamaan (2.41) dan (2.42) untuk mengikuti secara asimptot sebuah lintasan acuan yang dibangkitkan oleh kendaraan virtual (maya) berikut

$$\dot{x}_d = \cos(\psi_d) \cos(\theta_d) u_d - \sin(\psi_d) v_d + \sin(\theta_d) \cos(\psi_d) w_d,$$

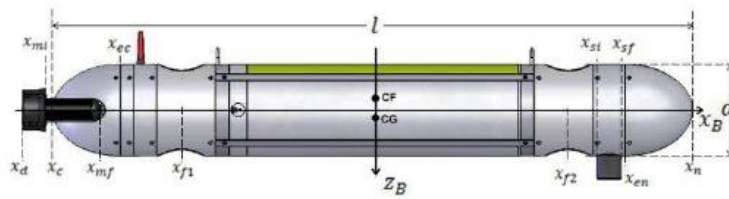
$$\begin{aligned}
\dot{y}_d &= \sin(\psi_d) \cos(\theta_d) u_d + \cos(\psi_d) v_d + \sin(\theta_d) \sin(\psi_d) w_d, \\
\dot{z}_d &= -\sin(\theta_d) u_d + \cos(\theta_d) w_d, \\
\dot{\theta}_d &= q_d, \\
\dot{\psi}_d &= \frac{r_d}{\cos(\theta_d)} \\
\dot{u}_d &= \frac{m_{22}}{m_{11}} v_d r_d - \frac{m_{33}}{m_{11}} w_d q_d - \frac{d_{11}}{m_{11}} u_d + \frac{1}{m_{11}} \tau_{ud} \\
\dot{v}_d &= \frac{m_{11}}{m_{22}} u_d r_d - \frac{d_{22}}{m_{22}} v_d \\
\dot{w}_d &= \frac{m_{11}}{m_{33}} u_d q_d - \frac{d_{33}}{m_{33}} w_d \\
\dot{q}_d &= \frac{m_{33} - m_{11}}{m_{55}} u_d w_d - \frac{d_{55}}{m_{55}} q_d - \frac{\rho g \nabla \overline{GM}_L \sin(\theta_d)}{m_{55}} + \frac{1}{m_{55}} \tau_{qd} \\
\dot{r}_d &= \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{66}} u_d v_d - \frac{d_{66}}{m_{66}} r_d + \frac{1}{m_{66}} \tau_{rd}
\end{aligned} \tag{2.43}$$

2.2.9 MARES AUV

Karakteristik dinamik dari *autonomous underwater vehicle* MARES berikut diambil dari penelitian yang dilakukan oleh Bruno Ferreira, Miguel Pinto, Anibal Matos, dan Nuno Cruz yang berjudul “Hydrodynamic modelling and motion limits of AUV MARES”. Vertical projection dari MARES AUV ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan lateral projection ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.7 Proyeksi Vertikal MARES [1]



Gambar 2.8 Proyeksi Lateral MARES [1]

Tabel 2.2 Karakteristik MARES

Panjang		1.5 m
Diameter		20 cm
Berat di udara		32 kg
Kedalaman operasi		100 m
Propulsion		2 horizontal + 2 vertical thruster
Kecepatan horisontal		0-1.5 m/s, variabel
Energi		Baterai Li-Ion, 600 Wh
Autonomy/Range		Sekitar 10 jam / 40 km

2.2.9.1 Persamaan Dinamika Gerak

Model dari MARES AUV mempertimbangkan semua karakteristik utama yang ditunjukkan pada Tabel 3.1 diatas. Turunan untuk model dinamika AUV mengikuti pendekatan standar yang ditunjukkan pada[8] yang mana digunakan dua kerangka acuan, yaitu *Earth Fixed Frame* (EFF) diasumsikan memiliki *inertial properties* dan *Body Fixed Frame* (BFF) yang bergerak bersama dengan wahana. Untuk menghubungkan kecepatan linier dan angular sebagaimana gaya dan torsi didefinisikan ke dalam dua kerangka, maka perlu untuk didefinisikan sebagai berikut,

$$\eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$$

$$v_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad v_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \tau_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix}$$

Dimana η_1 dan η_2 adalah posisi relatif dan orientasi BFF yang mengacu pada inertial frame; v_1 dan v_2 adalah kecepatan linier dan angular yang ditunjukkan pada koordinat kerangka body; τ_1 dan τ_2 adalah gaya dan torsi yang berlaku pada vehicle, juga diekspresikan dalam koordinat kerangka body.

Didefinisikan $\eta = [\eta_1^T \quad \eta_2^T]^T$, $v = [v_1^T \quad v_2^T]^T$ dan $J = \text{diag}(J_1, J_2)$ dimana,

$$J_1 = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & s\phi + t\theta & c\phi\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Hubungan antara kecepatan linier dan angular dalam dua kerangka adalah

$$\dot{\eta} = J(\eta_2)v. \quad (2.46)$$

Dinamika vehicle dengan mudah ditunjukkan pada BFF oleh

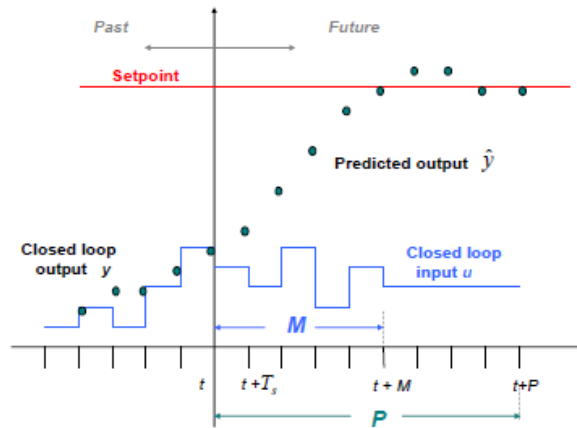
$$\tau_{ext} = M_{RB}\ddot{\eta} + C_{RB}(\dot{\eta})\dot{\eta}, \quad (2.47)$$

Dimana τ_{ext} adalah vektor komposisi dari gaya eksternal dan torsi yang berlaku pada vehicle, diekspresikan dalam koordinat kerangka body, M_{RB} adalah inertial matrix dan $C_{RB}(\dot{\eta})\dot{\eta}$ adalah matriks Coriolis dan centripetal. Gaya eksternal dan momen dapat didekomposisi sebagai jumlah dari added mass, potential damping, drag, restoring, dan propulsi,

$$\tau_{ext} = \tau_A + \tau_B + \tau_V + \tau_C + \tau_{prop} \quad (2.48)$$

2.2.10 Model Predictive Control (MPC)

Model predictive control menyelesaikan masalah online *finite horizon open-loop optimal control* untuk memilih *control horizon* berdasarkan *output trajectory* yang diinginkan dan gangguan termasuk state dan kontrol. Gambar 2.9 menunjukkan prinsip umum dari Model Predictive Control (MPC).



Gambar 2.9 Prinsip Model Predictive Control

Berdasarkan pengukuran didapatkan pada waktu t , kontroler memprediksi perilaku dinamik akan datang dari sistem lebih dari horizon prediksi P dan penentuan (lebih dari horizon kontrol $M \leq P$) input seperti *predetermined open-loop performance objective functional* dioptimalkan. Jika tidak ada disturbance dan tidak ada model/plant mismatch, dan jika permasalahan optimisasi dapat diselesaikan untuk infinite horizon, kemudian salah satunya dapat menggunakan fungsi input yang didapatkan saat $t = 0$ ke sistem untuk semua waktu $t \geq 0$. Namun, hal ini tidak mungkin secara umum. Karena gangguan dan model / plant mismatch, perilaku sistem yang sangat berbeda dari perilaku yang diprediksi.

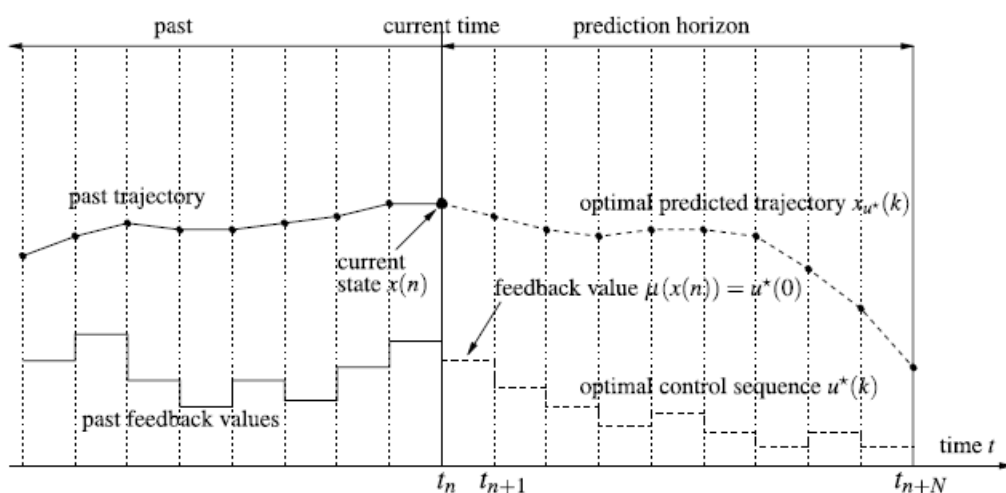
Dalam urutan untuk menggabungkan beberapa mekanisme umpan balik, open-loop fungsi input termanipulasi yang diperoleh akan diimplementasikan hanya sampai pengukuran berikutnya menjadi ada. Perbedaan waktu antara dua pengukuran dapat bervariasi jika diperlukan, namun sering diasumsikan untuk diperbaiki, yaitu pengukuran akan berlangsung setiap T_s waktu sampling unit.

Menggunakan pengukuran baru pada waktu $t + T_s$ prediksi prosedur dan optimasi diulang untuk menemukan fungsi masukan baru dengan kontrol dan horizon prediksi bergerak maju (untuk alasan ini, MPC juga disebut sebagai moving horizon control).

Jika relasi output/input dari plant adalah linier, permasalahannya adalah LMPC dan masalah optimasi adalah convex dan relatif mudah untuk diselesaikan menggunakan existing tools. Jika relasi output/input adalah nonlinier maka akan menjadi NMPC dan masalah optimasi dapat diselesaikan.

Nonlinear model predictive control (NMPC) adalah sebuah optimisasi berdasarkan metode untuk kontrol umpan baliksistem nonlinier. Aplikasi primer adalah masalah stabilisasi dan *tracking*.

Misal, diberikan proses terkontrol yang state $x(n)$ yang diukur saat waktu diskrit $t_n, n = 0, 1, 2, \dots$ “Terkontrol” mengandung arti bahwa tiap waktu dapat memilih input kontrol $u(n)$ yang mempengaruhi perilaku state sistem masa mendatang. Pada *tracking control*, tugasnya adalah menentukan input kontrol $u(n)$ sedemikian sehingga $x(n)$ mengikuti referensi yang diberikan $x^{ref}(n)$ dengan sebaik-baiknya. Hal ini berarti jika state saat ini jauh dari referensi maka diharapkan pengaturan sistem mengarahkan kembali pada referensi dan jika state saat ini sudah mendekati referensi maka diharapkan state tetap seperti itu.



Gambar 2.10 Ilustrasi NMPC saat waktu t_n

Dianggap $x(n) \in X = R^d$ dan $u(n) \in U = R^m$, selanjutnya dianggap referensi yang digunakan adalah konstan dan sama dengan $x_* = 0$, *i.e.*, $x^{ref}(n) = x_* = 0$ untuk semua $n \geq 0$. Agar dapat memberikan reaksi untuk deviasi sekarang $x(n)$ dari nilai referensi $x_* = 0$, digunakan $u(n)$ dalam bentuk umpan balik, yaitu dalam bentuk $u(n) = \mu(x(n))$ untuk beberapa beberapa μ memetakan state $x \in X$ ke dalam setelan U dari nilai kontrol.

Ide dari model predictive control baik linier maupun nonlinier adalah untuk menggunakan model proses saat ini dalam rangka untuk memprediksi dan mengoptimasi perilaku sistem masa mendatang. Digunakan model dalam bentuk

$$x^+ = f(x, u) \quad (2.51)$$

dimana $f : X \times U \rightarrow X$ adalah peta yang diketahui dan dalam nonlinier umum yang memberikan state x dan nilai kontrol u state pengganti x^+ saat waktu berikutnya. Berawal dari state sekarang $x(n)$, untuk urutan control yang diberikan $u(0), \dots, u(N-1)$ dengan panjang horizon $N \geq 2$, dapat mengiterasi persamaan (2.51) dalam rangka untuk membangun prediction trajectory x_n yang didefinisikan sebagai

$$x_u(0) = x(n), x_u(k+1) = f(x_u(k), u(k)), k = 0, \dots, N-1. \quad (2.52)$$

Dengan cara ini, didapatkan prediksi $x_u(k)$ untuk state sistem $x(n+k)$ saat waktu t_{n+k} pada masa mendatang. Karena itu, didapatkan prediksi perilaku sistem dalam interval diskrit t_n, \dots, t_{n+N} bergantung pada urutan kontrol yang dipilih $u(0), \dots, u(N-1)$.

Kemudian digunakan kontrol optimal dalam rangka untuk menentukan $u(0), \dots, u(N-1)$ yang mana x_u mendekati $x_* = 0$. Pada akhirnya, dihitung jarak antara $x_u(k)$ dan $x_* = 0$ untuk $k = 0, \dots, N-1$ oleh fungsi $\ell(x_u(k), u(k))$. Disini, tidak hanya mengijinkan untuk menanggulangi state deviasi dari referensi tetapi

juga –jika diperlukan- jarak nilai kontrol $u(k)$ ke kontrol referensi u_* , yang mana dipilih $u_* = 0$.

Pilihan umum untuk tujuan ini adalah

$$\ell(x_u(k), u(k)) = \|x_u(k)\|^2 + \lambda \|u(k)\|^2 \quad (2.53)$$

Dimana $\|\cdot\|$ dinotasikan sebagai *Euclidean norm* dan $\lambda \geq 0$ adalah parameter pembobot untuk kontrol, yang dapat dipilih sebagai 0. Masalah kontrol optimal saat ini meminimalkan

$$J(x(n), u(\cdot)) := \sum_{k=0}^{N-1} \ell(x_u(k), u(k))$$

Dengan mengacu pada semua urutan kontrol yang dapat diterima $u(0), \dots, u(N-1)$ dengan x_u dibangkitkan dari persamaan (2.52). Diasumsikan bahwa masalah kontrol optimal memiliki solusi yang diberikan dengan meminimalkan urutan kontrol $u^*(0), \dots, u^*(N-1)$ adalah sebagai berikut,

$$\min_{u(0), \dots, u(N-1)} J(x(n), u(\cdot)) = \sum_{k=0}^{N-1} \ell(x_{u^*}(k), u^*(k)). \quad (2.54)$$

Dalam rangka untuk mendapatkan nilai umpan balik yang diinginkan $\mu(x(n))$, sekarang diatur $\mu(x(n)) := u^*(0)$, dengan prosedur sebagai berikut, diaplikasikan elemen pertama urutan kontrol optimal. Prosedur ini ditampilkan pada Gambar 2.10. Pada waktu t_{n+1}, t_{n+2}, \dots diulangi prosedur dengan pengukuran baru $x(n+1), x(n+2), \dots$ dalam rangka untuk mendapatkan nilai umpan balik $\mu(x(n+1)), \mu(x(n+2)), \dots$ dengan kata lain, kita dapatkan nilai umpan balik μ dengan optimasi online secara berulang melebihi prediksi yang dibangkitkan oleh model.

Algoritma NMPC termasuk keluarga dari strategi control optimal, dimana *cost function* didefinisikan diatas horizon masa mendatang,

$$\mathfrak{J}(x, u) = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_r} (y(t+\tau) - y_r(t+\tau))^T (y(t+\tau) - y_r(t+\tau)) d\tau \quad (2.55)$$

Dimana τ_r adalah waktu prediksi, $y(t+\tau)$ sebuah langkah τ mendahului prediksi dari keluaran system dan $y_r(t+\tau)$ trayektori referensi masa mendatang. Pembobot control tidak termasuk ke dalam cost function. Bagaimanapun, usaha control dapat diperoleh dengan menentukan waktu prediksi.

Objektif dari *model predictive control* adalah untuk menghitung control $u(t)$ dalam sebuah cara keluaran plant masa mendatang $y(t + \tau)$ digerakkan mendekati $y_r(t + \tau)$. Hal ini diselesaikan dengan meminimalkan \mathfrak{J} .

2.2.10.1 Kontrol Prediktif untuk Sistem SISO

Sistem Model Predictive Control didesain berdasarkan model matematis dari plant. Model digunakan dalam desain system control yang diambil menjadi state-space model. Dengan menggunakan state-space model, informasi saat ini dibutuhkan untuk memprediksi yang direpresentasikan oleh variable state saat ini.

Untuk lebih mudahnya, diasumsikan plant adalah system single-input and single-output (SISO), dideskripsikan sebagai berikut,

$$\begin{aligned}x_m(k+1) &= A_m x_m(k) + B_m u(k), \\y(k) &= C_m x_m(k)\end{aligned}\quad (2.56)$$

Dimana u adalah manipulated variable atau variable input; y adalah output dari proses; dan x_m adalah vektor variabel state dengan diasumsikan memiliki dimensi n_1 . Sebagai catatan bahwa model plant ini memiliki $u(k)$ sebagai input. Maka, diperlukan untuk mengubah model sesuai dengan desain yang mana ditambahkan integrator.

Formula umum dari model state-space memiliki bentuk langsung dari sinyal input $u(k)$ ke output $y(k)$ sebagai

$$y(k) = C_m x_m(k) + D_m u(k) \quad (2.57)$$

Akan tetapi, karena prinsip dari receding horizon control, dimana informasi saat ini dari plant dibutuhkan untuk prediksi dan control, maka secara mutlak diasumsikan bahwa input $u(k)$ tidak dapat mempengaruhi output $y(k)$ di waktu yang sama. Maka pada model plant $D_m = 0$

Mengambil operasi berbeda pada dua sisi pada persamaan diatas, didapatkan,

$$x_m(k+1) - x_m(k) = A_m (x_m(k) - x_m(k+1)) + B_m (u(k) - u(k-1))$$

Maka variabel state dinotasikan menjadi

$$\Delta x_m(k+1) = x_m(k+1) - x_m(k); \Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1) \quad (2.58)$$

Dan variabel kontrol adalah,

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (2.59)$$

Ini adalah penambahan variabel $x_m(k)$ dan $u(k)$. Dengan transformasi ini, persamaan state-space menjadi,

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (2.60)$$

Sebagai catatan bahwa input ke model state-space adalah $\Delta u(k)$. Langkah berikutnya adalah menghubungkan $\Delta x_m(k)$ dengan output $y(k)$. Untuk melakukannya, variabel state yang baru dipilih menjadi,

$$x(k) = \left[\Delta x_m(k)^T \ y(k) \right]^T,$$

$$\begin{aligned} y(k+1) - y(k) &= C_m (x_m(k+1) - x_m(k)) = C_m \Delta x_m(k+1) \\ &= C_m A_m \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) \end{aligned}$$

Dengan mengambil dua persamaan diatas, maka didapatkan model state-space sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_m & o_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} o_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.61)$$

Dimana $o_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$. (A, B, C) disebut *augmented model*, yang akan digunakan untuk mendesain kontrol prediktif.

2.2.10.2 Kontrol Prediktif untuk Sistem MIMO

Diasumsikan bahwa plant memiliki input m , output q , dan state n_1 . Diasumsikan juga jumlah dari output kurang dari atau sama dengan jumlah input ($q \leq m$). Jika jumlah output lebih dari jumlah input, kita tidak dapat mengatur output terukur secara independen dengan zero steady-state error. Dalam persamaan umum dari masalah kontrol prediktif, disertakan noise dan disturbance plant ke dalam,

$$\begin{aligned} x_m(k+1) &= A_m x_m(k) + B_m u(k) + B_d \omega(k) \\ y(k) &= C_m x_m(k), \end{aligned} \quad (2.62)$$

Dimana $\omega(k)$ adalah *input disturbance*, diasumsikan menjadi urutan dari *integrated white noise*. Ini berarti bahwa *input disturbance* $\omega(k)$ relasi dengan *zero-mean*, urutan *white noise* $e(k)$ sebagai berikut,

$$\omega(k) - \omega(k-1) = e(k) \quad (2.63)$$

Sebagai catatan bahwa persamaan di bawah ini juga benar,

$$x_m(k) = A_m x_m(k-1) + B_m u(k-1) + B_d \omega(k-1) \quad (2.64)$$

Dengan mendefinisikan $\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1)$ dan $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, dan persamaan menjadi

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) + B_d e(k) \quad (2.65)$$

Untuk menghubungkan output $y(k)$ ke variabel state $x_m(k)$, dapat ditarik kesimpulan bahwa

$$\Delta y(k+1) = C_m \Delta x_m(k+1) = C_m A_m \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) + C_m B_d e(k),$$

Dimana $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$.

Dipilih vektor variabel state $x(k) = [\Delta x_m(k)^T \quad y(k)^T]^T$, maka diperoleh,

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & o_m^T \\ C_m A_m & I_{q \times q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} B_d \\ C_m B_d \end{bmatrix} e(k)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} o_m & I_{q \times q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}, \quad (2.66)$$

Dimana $I_{q \times q}$ adalah matriks identitas dengan dimensi $q \times q$, yang mana adalah jumlah dari output, dan o_m adalah $q \times n_1$ zero matrix. A_m, B_m, C_m memiliki dimensi $n_1 \times n_1, n_1 \times m$, dan $q \times n_1$ secara berturut-turut.

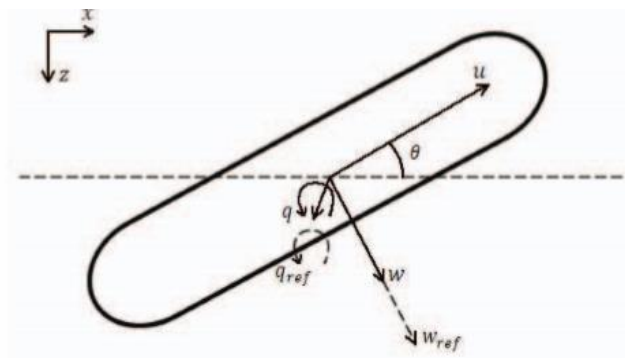
BAB 3

PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini akan diuraikan tentang tahapan-tahapan perancangan kontroler dalam menyelesaikan permasalahan yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya. Dengan mengacu pada tinjauan yang ada, perancangan sistem ini berguna untuk mempermudah dan menjelaskan secara rinci apa saja yang dilakukan dalam menyelesaikan permasalahan tersebut. Dalam perancangan sistem digunakan *software* Matlab.

3.1 Kontrol Kecepatan, Kedalaman, dan Pitch MARES AUV

Pada subbab ini akan direduksi model nonlinier 4 DOF MARES AUV menjadi 3 DOF dalam model longitudinal yang dapat digunakan untuk pengaturan kecepatan, kedalaman, dan pitch. Kontroler akan diimplementasikan menggunakan kontrol kecepatan dan kontrol posisi dalam surge, heave dan pitch.



Gambar 3.1 Koordinat BFF dan EFF pada model longitudinal [1]

Seperti yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya, pergerakan model longitudinal pada MARES AUV dipengaruhi oleh *Earth Fixed Frame* (EFF) dan *Body Fixed Frame* (BFF) yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Gerak translasi pada model longitudinal adalah gerak surge yang dinotasikan dengan u menunjukkan arah gerak translasi pada sumbu- x dan gerak heave yang dinotasikan dengan w menunjukkan arah gerak translasi pada sumbu- z . Gerak rotasi pada model longitudinal adalah gerak pitch yang dinotasikan dengan q menunjukkan arah gerak rotasi pada sumbu- y . Pada tesis ini diharapkan AUV bergerak dengan kecepatan u yang konstan.

Dinamika untuk model longitudinal ini diambil dari penelitian Bruno Ferreira [1]. Model yang direduksi untuk gerak vertikal, mempertimbangkan bahwa *the cross-term* ($X_{q|q}, Y_{p|p}$) dapat ditiadakan:

$$\tilde{M}\tilde{v} = -\tilde{C}(\tilde{v})\tilde{v} - \tilde{D}(\tilde{v})\tilde{v} - \tilde{g}(\eta_2) + \tilde{P}_f f_t(t) \quad (3.1)$$

Dimana $\tilde{v} = [u \quad w \quad q]^T$ dan

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -X_{\dot{q}} \\ 0 & m - Z_{\dot{w}} & -Z_{\dot{q}} \\ -M_{\dot{u}} & -M_{\dot{w}} & -M_{\dot{q}} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{C}(\tilde{v}) = \begin{bmatrix} 0 & -mq & -Z_{\dot{w}}w - Z_{\dot{q}}q \\ -mq & 0 & X_{\dot{u}}u + X_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{q}}q & -X_{\dot{u}}u - X_{\dot{q}}q & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{D}(\tilde{v}) = \begin{bmatrix} X_{|u|u} |u| & 0 & X_{|q|q} |q| \\ 0 & Z_{|w|w} |w| & Z_{|q|q} |q| \\ M_{|u|u} |u| & M_{|w|w} |w| & M_{|q|q} |q| \end{bmatrix}, \quad \tilde{g}(\eta_2) = - \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ (B - W) \cos \theta \\ -z_{CB} B \sin \theta \end{bmatrix},$$

$$\tilde{P}_f = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & x_{ts} & x_{tb} \end{bmatrix}, \quad f_t(t) = \begin{bmatrix} f_p(t) \\ f_r(t) \\ f_s(t) \\ f_b(t) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Dari persamaan 3.2 diketahui bahwa $f_t(t)$ adalah vector gaya yang diaplikasikan oleh pendorong yang dibangkitkan menurut *control law* yang diberikan, dan f_p , f_r , f_s dan f_b adalah skalar yang merepresentasikan gaya yang berlaku pada port, starboard, stern, dan bow thruster. Diasumsikan gaya dapat langsung terukur selama operasi. Pencantuman kecepatan surge dibutuhkan dalam reduced order model ini. Karena pengaruh nonnegligible dimiliki oleh dinamika vertical plane. Parameter yang digunakan pada model dinamik MARES AUV ditunjukkan pada Lampiran. Kontroler diimplementasikan pada kecepatan dan posisi dalam surge, heave, dan pitch.

Untuk kontrol posisi dalam gerak vertical, persamaan (2.46) direduksi menjadi model sebagai berikut,

$$\tilde{\eta} = \tilde{J}(\eta_2)\tilde{v}. \quad (3.3)$$

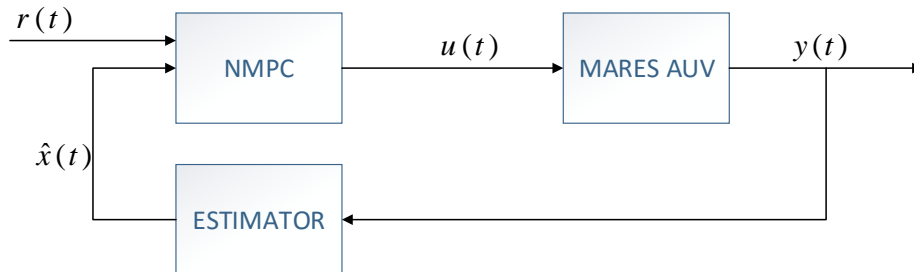
dengan $\tilde{\eta} = [x \quad z \quad \theta]^T$

Model untuk posisi vertical mengacu pada EFF. Didefinisikan $\tilde{J}(\eta_2)$ sebagai matriks rotasi yang diasumsikan bahwa tidak ada gerakan roll ($\phi = 0$), sehingga menghasilkan matriks sebagai berikut

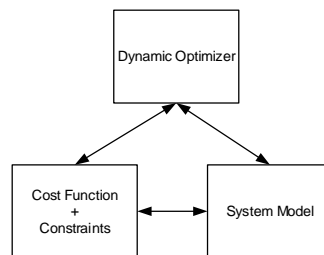
$$\tilde{J}(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dengan mengacu pada Gambar 3.1, posisi gerak translasi pada model longitudinal adalah posisi pada gerak surge yang dinotasikan dengan x menunjukkan posisi gerak translasi pada sumbu- x dan posisi pada gerak heave yang dinotasikan dengan z menunjukkan posisi gerak translasi pada sumbu- z . Posisi gerak rotasi pada model longitudinal adalah posisi gerak pitch yang dinotasikan dengan θ menunjukkan posisi gerak rotasi pada sumbu- y .

3.2 Perancangan kontroler NMPC



Gambar 3. 2 Diagram Blok Keseluruhan Sistem



Gambar 3.3 NMPC control loop

Diagram blok keseluruhan sistem ditunjukkan pada Gambar 3.2, dimana masukan masa sekarang dan keluaran masa sekarang digunakan sebagai masukan nonlinier estimator untuk menghasilkan state yang terestimasi yang kemudian dibandingkan dengan referensi. Struktur dasar dari Nonlinear model predictive control (NMPC) *control loop* ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dapat disimpulkan skema basic NMPC adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan estimasi state dari sistem
2. Mendapatkan sinyal input optimal dengan meminimalkan cost function yang diberikan selama horizon prediksi pada masa mendatang menggunakan model dari sistem
3. Implementasikan bagian pertama dari sinyal input optimal sampai pengukuran baru/estimasi state dapat digunakan
4. Kembali ke nomor 2.

NMPC digunakan pada tesis ini karena kemampuannya untuk mengendalikan *multiple degrees of freedom* menggunakan model dari sistem dengan *constraints*, dimana algoritma kontrol dari NMPC menghitung input kontrol melewati *finite number* dari waktu *step* untuk mereduksi error. *Constraints* ditetapkan dalam kontroler, memungkinkan kontrol optimal untuk dihitung dalam *stated constraints*.

Algoritma yang digunakan pada tesis ini adalah algoritma NMPC untuk time varying reference x^{ref} dengan estimasi posteriori suboptimalitas. Algoritmanya adalah sebagai berikut :

Atur $\alpha = 1$, pada tiap waktu sampling $t_n, n = 0, 1, 2, \dots$:

1. Hitung state sistem $x(n) \in X$
2. Atur $x_0 = x(n)$ dan selesaikan masalah kontrol optimal berikut :

$$\text{Minimalkan } J_N(n, x_0, u(\cdot)) := \sum_{k=0}^{N-1} \ell(n+k, x_u(k, x_0), u(k))$$

Dengan mengacu pada $u(\cdot) \in U^N(x_0)$, subject to

$$x_u(0, x_0) = x_0, x_u(k+1, x_0) = f(x_u(k, x_0), u(k)) \quad (3.5)$$

menunjukkan urutan kontrol optimal yang telah diselesaikan oleh $u^*(\cdot) \in U^N(x_0)$.

3. Definisikan nilai umpan balik NMPC $\mu_N(n, x(n)) := u^*(0) \in U$ dan gunakan nilai ini untuk sampling berikutnya
4. Jika $n \geq 1$ hitung α dengan

$$\begin{aligned}\alpha_l &= \frac{V_N(n-1, x(n-1)) - V_N(n, x(n))}{\ell(n-1, x(n-1), \mu_N(n-1, x(n-1)))}, \\ \alpha &= \min\{\alpha, \alpha_l\}\end{aligned}\tag{3.6}$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menerapkan kontroler Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) secara umum pada model longitudinal MARES AUV. Selanjutnya mencari nilai u yang optimal pada NMPC. Menganalisa performa dari hasil simulasi sistem control NMPC dalam mengikuti model following. Terakhir melakukan interpretasi dari hasil yang didapat.

4.1 Persamaan Nonlinear Gerak MARES AUV

Persamaan nonlinear gerak AUV diperoleh dari penggabungan persamaan gerak dinamika rigid body AUV dengan persamaan gaya dan momen pada AUV sehingga diperoleh persamaan nonlinear gerak AUV yang telah diringkas dalam bentuk matriks yaitu :

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & -X_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & -Y_{\dot{p}} & 0 & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & m - Z_{\dot{w}} & 0 & -Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -K_{\dot{v}} & 0 & I_{xx} - K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ -M_{\dot{u}} & 0 & -M_{\dot{w}} & 0 & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum X \\ \sum Y \\ \sum Z \\ \sum K \\ \sum M \\ \sum N \end{bmatrix}$$

Sehingga dapat dinyatakan sebagai,

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & -X_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & -Y_{\dot{p}} & 0 & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & m - Z_{\dot{w}} & 0 & -Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -K_{\dot{v}} & 0 & I_{xx} - K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ -M_{\dot{u}} & 0 & -M_{\dot{w}} & 0 & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum X \\ \sum Y \\ \sum Z \\ \sum K \\ \sum M \\ \sum N \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

dimana

$$\sum X = -(W - B) \sin \theta + f_{p1} + f_{p2} - X_{u|u} u | u | + mrv - mqw - ((-Z_{\dot{w}} w - Z_{\dot{q}} q) + X_{q|q} | q |) q - (Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{p}} p + Y_{\dot{r}} r) r$$

$$\sum Y = -mru - Y_{v|v} v | v | + mpw - (Z_{\dot{w}} w + Z_{\dot{q}} q + Y_{p|p} | p |) p - (-X_{\dot{u}} u - X_{\dot{q}} q + Y_{r|r} | r |) r$$

$$\sum Z = (W - B) \cos \theta + f_{p3} + f_{p4} + mqu - mpv - Z_{w|w} | w | w + (Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{p}} p + Y_{\dot{r}} r) p - (X_{\dot{u}} u + X_{\dot{q}} q + Z_{q|q} | q |) q + Z_{uw} uw$$

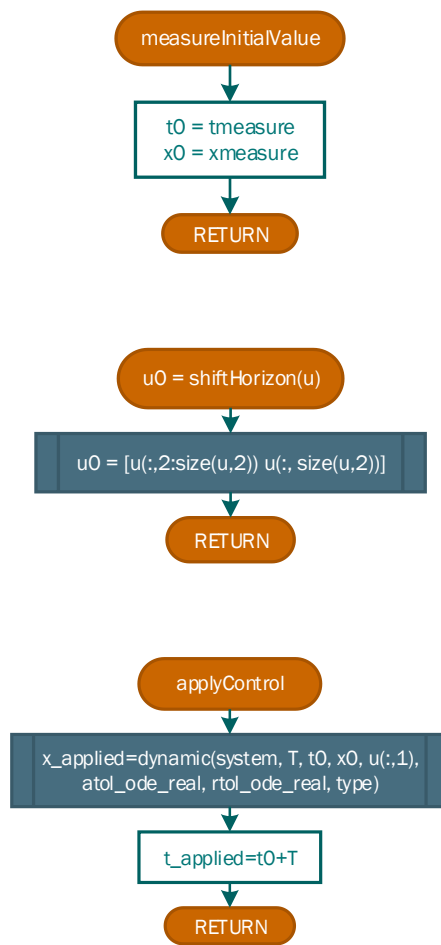
$$\sum K = -(-Z_{\dot{w}} w - Z_{\dot{q}} q + K_{v|v} | v |) v - (Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{p}} p + Y_{\dot{r}} r) w - K_{p|p} | p | p - (I_{zz} r - Y_{\dot{v}} v - N_{\dot{r}} r) q - (-I_{yy} q + X_{\dot{q}} u + Z_{\dot{q}} w + M_{\dot{q}} q) r$$

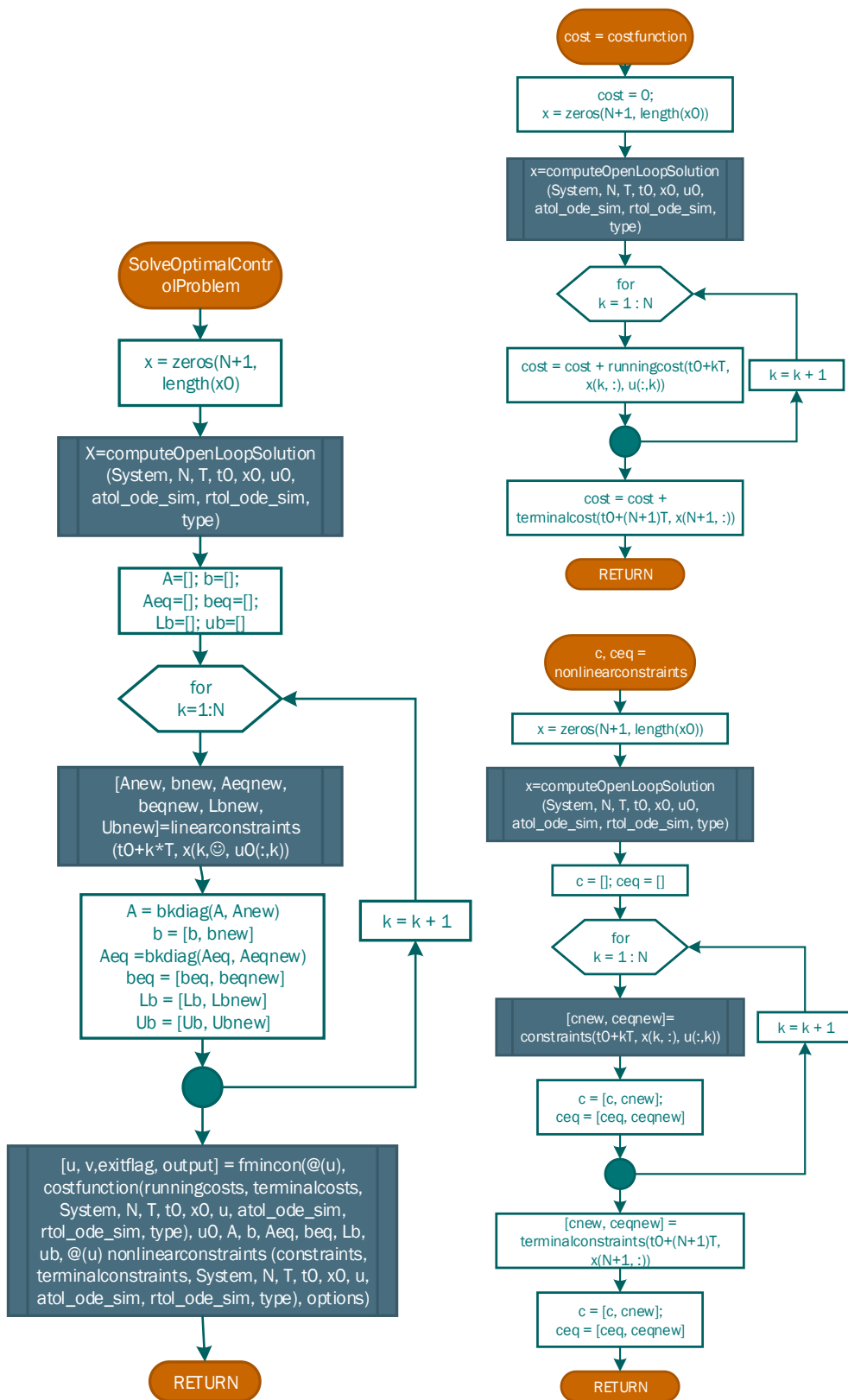
$$\sum M = -(Z_{\dot{w}} w + Z_{\dot{q}} q + M_{u|u} u | u | - (-X_{\dot{u}} u - X_{\dot{q}} q + M_{w|w} w | w | - (-I_{zz} r + Y_{\dot{v}} v + N_{\dot{r}} r) p - M_{q|q} | q | - (I_{xx} p + Y_{\dot{p}} v - K_{\dot{p}} p) r) + z_{cf} B \sin \theta + Z_{p1} f_{p1} + Z_{p2} f_{p2} - x_{p3} f_{p3} - x_{p4} f_{p4}$$

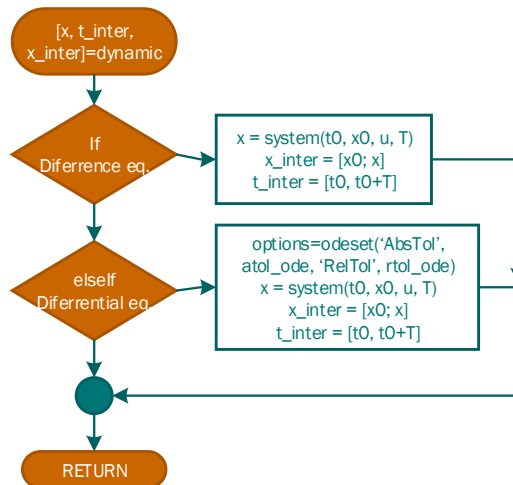
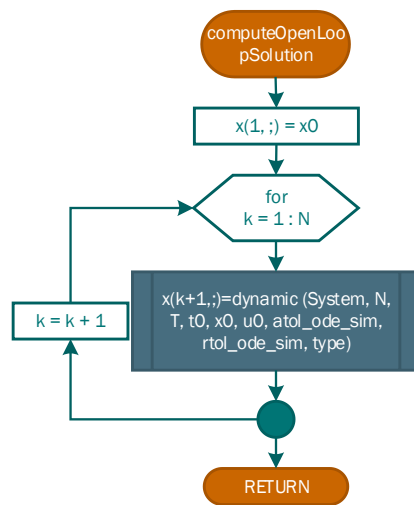
$$\sum N = (Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{p}} p + Y_{\dot{r}} r) u - (X_{\dot{u}} u + X_{\dot{q}} q + N_{v|v} | v |) v - (I_{yy} q - X_{\dot{q}} u - Z_{\dot{q}} w - M_{\dot{q}} q) p - (-I_{xx} w + Y_{\dot{p}} v + K_{\dot{p}} p) q - N_{r|r} | r | r - Y_{p1} f_{p1} - Y_{p2} f_{p2}$$

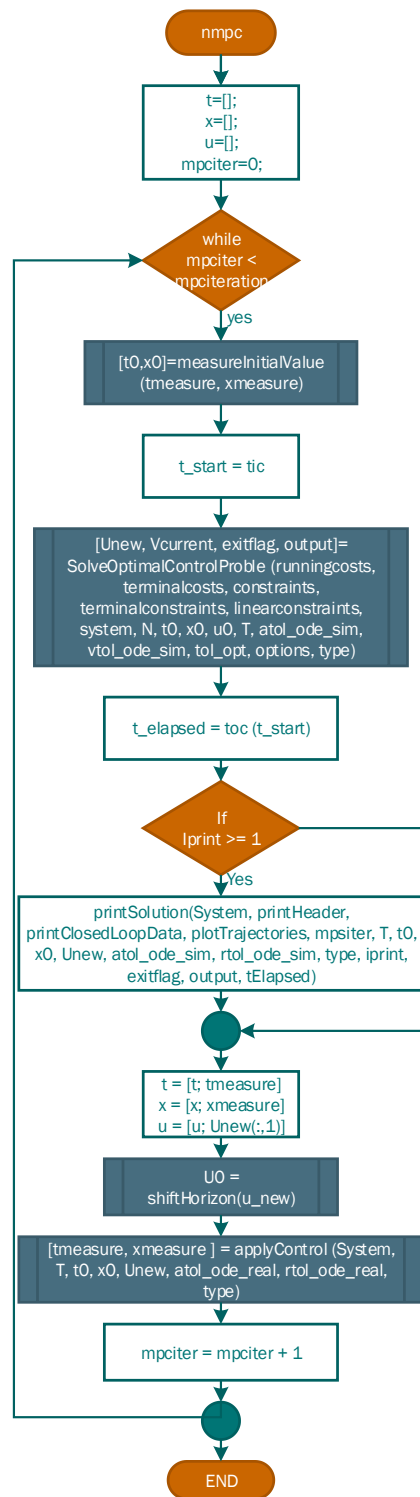
4.2 Desain Kontrol Kedalaman MARES AUV dengan metode NMPC

Flowchart program Matlab yang digunakan untuk mengontrol kedalaman dari MARES AUV ditunjukkan dalam Gambar 4.1.









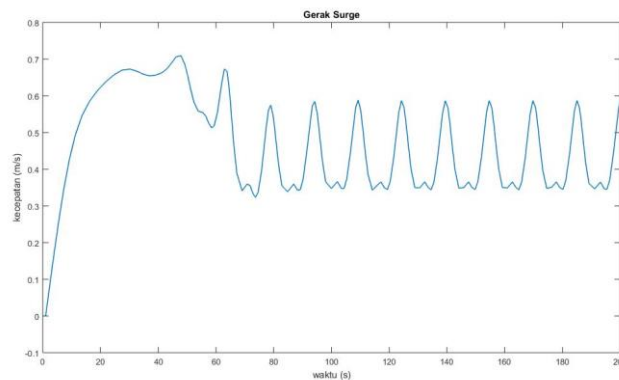
Gambar 4.1 Flowchart program NMPC pada Matlab

4.3 Simulasi dan Analisis Hasil Desain Kontrol MARES AUV

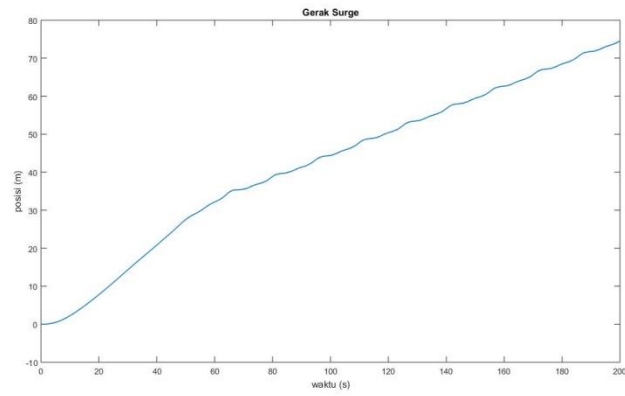
Berdasarkan hasil desain sistem kontrol pada subbab sebelumnya, didapatkan hasil simulasi plant MARES AUV tanpa control dan dikontrol menggunakan NMPC.

4.3.1 Simulasi Desain Plant MARES AUV Tanpa Kontrol

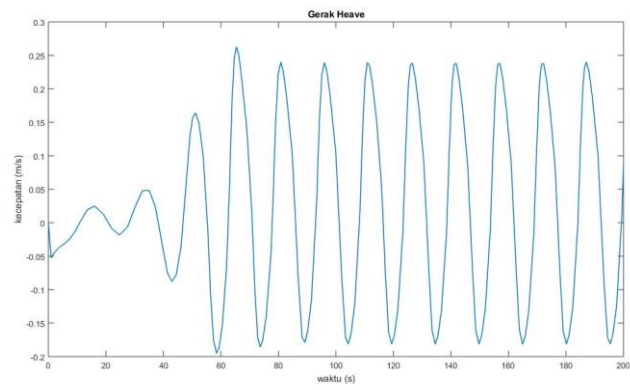
Persamaan 4.1 disimulasikan pada Simulink Matlab dengan parameter pada lampiran dan didapatkan hasil simulasi berupa grafik gerak surge, heave, dan pitch pada MARES AUV. Grafik kecepatan dan posisi pada gerak surge yang ditunjukkan pada Gambar 4.4a dan 4.4b tampak bahwa gerak surge tanpa control belum stabil dan terjadi osilasi pada sepanjang waktu sampling. Grafik kecepatan dan posisi pada gerak heave yang ditunjukkan pada Gambar 4.5a dan 4.5b juga menunjukkan gerak yang tidak stabil dan berosilasi, begitu juga pada Gambar 4.6a dan 4.6b yang menunjukkan grafik kecepatan dan posisi pada gerak pitch. Sehingga sistem ini membutuhkan perlakuan kontrol pada model longitudinal MARES AUV.



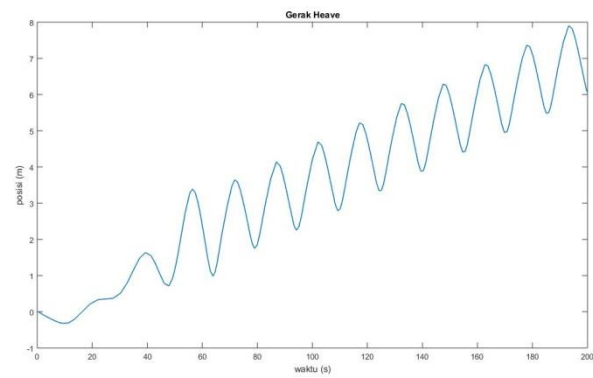
Gambar 4.2a Kecepatan Gerak Surge Tanpa Kontrol



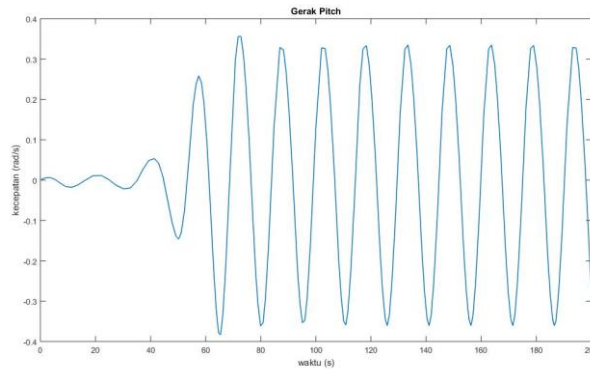
Gambar 4.2b. Posisi Gerak Surge Tanpa Kontrol



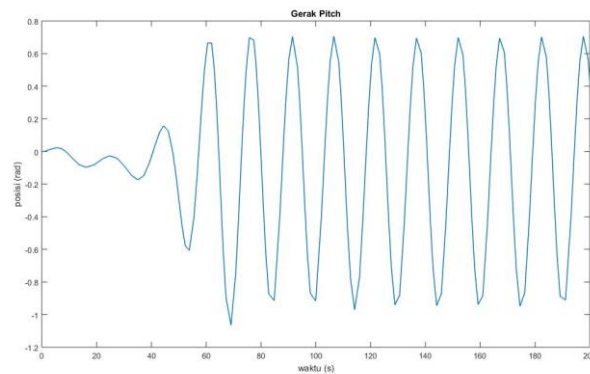
Gambar 4.3a. Kecepatan Gerak Heave Tanpa Kontrol



Gambar 4.3b. Posisi Gerak Heave Tanpa Kontrol



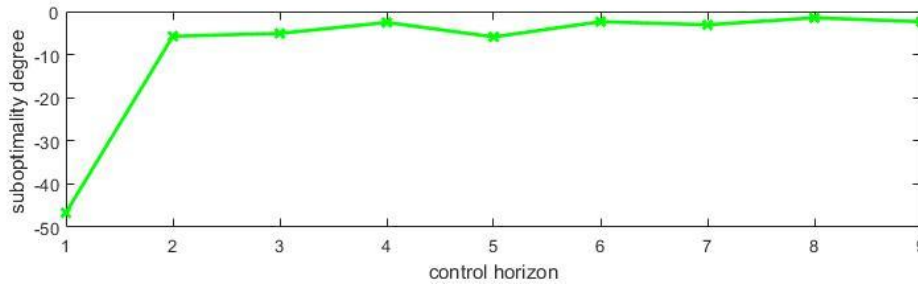
Gambar 4.4a Kecepatan Gerak Pitch Tanpa Kontrol



Gambar 4.4b. Posisi Gerak Pitch Tanpa Kontrol

4.3.2 Simulasi desain Plant MARES AUV menggunakan NMPC

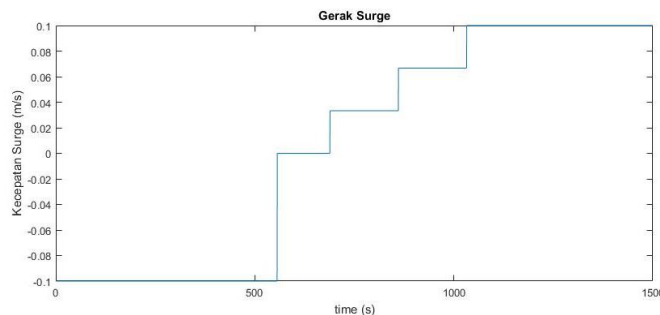
Dari algoritma yang telah dituliskan dalam subbab 3.2, dibuat program dalam Matlab kemudian didapatkan hasil untuk nilai derajat suboptimalitas α bergantung pada nilai horizon kontrol m . Pada Gambar 4.5 menunjukkan nilai α terestimasi untuk model linier MARES AUV dengan nilai inisial yang diatur variasinya. Nilai α didapatkan dengan metode yang dipakai oleh Grune dan Pannek [21] digunakan untuk komputasi online atau estimasi α sepanjang trayektori NMPC loop tertutup yang disimulasikan.



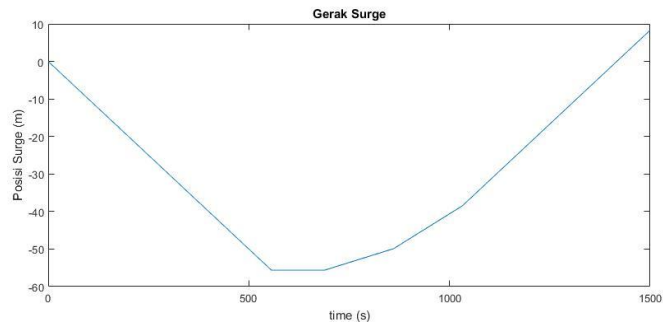
Gambar 4.5 Nilai estimasi suboptimalitas sepanjang trayektori

Nilai α yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 didapatkan dari langkah ke (4) pada algoritma bab 3.2. Nilai ini berguna untuk mengetahui performa dari kontroler. Selain itu, nilai tersebut digunakan untuk men-tuning parameter kontroler, horizon optimasi N , dan running cost ℓ . Dari Gambar 4.5 menunjukkan α yang terlalu kecil (bernilai negatif), ini menunjukkan bahwa perlu untuk menaikkan nilai horizon optimasi N .

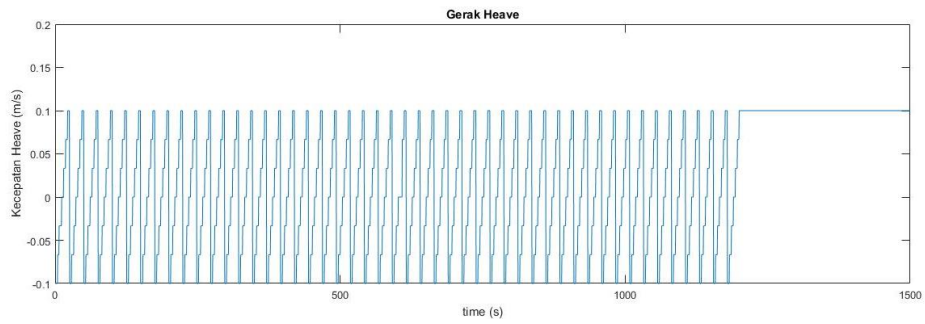
Kontroler NMPC dibuat dalam program Matlab sesuai dengan algoritma yang telah dituliskan pada bab 3.2 dengan diberikan nilai horizon kontrol dan horizon prediksi sebesar 9 dan periode sampling sebesar 0.5 detik. Simulasi menunjukkan hasil sampling sebanyak 2041 sampling. Hasil simulasi kontrol gerak MARES AUV menggunakan NMPC ditunjukkan pada Gambar 4.6, Gambar 4.7, dan Gambar 4.8.



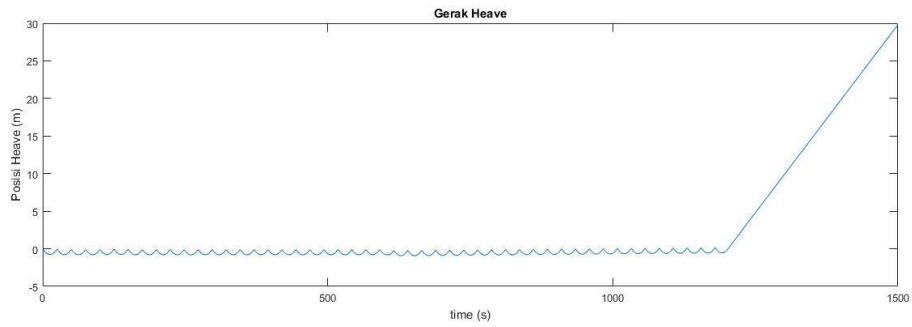
Gambar 4.6 Kecepatan Gerak Surge menggunakan NMPC



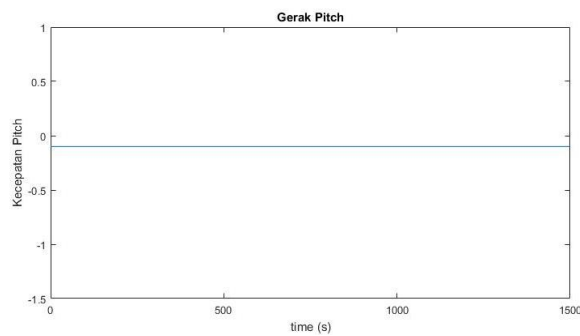
Gambar 4.6b. Posisi Gerak Surge menggunakan NMPC



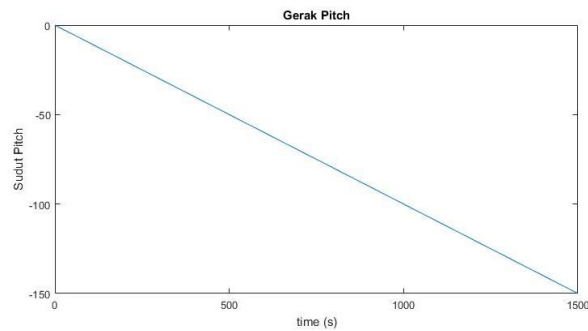
Gambar 4.7a. Kecepatan Gerak Heave menggunakan NMPC



Gambar 4.7b. Posisi Gerak Heave menggunakan NMPC



Gambar 4.8a. Kecepatan Gerak Pitch menggunakan NMPC



Gambar 4.8b. Posisi Gerak Pitch menggunakan NMPC

Grafik kecepatan dan posisi pada gerak surge yang telah dikontrol menggunakan NMPC ditunjukkan pada Gambar 4.6a dan 4.6b tampak bahwa gerak surge stabil di waktu ke 1000 detik. Grafik kecepatan dan posisi pada gerak heave yang telah dikontrol menggunakan NMPC ditunjukkan pada Gambar 4.7a dan 4.7b juga menunjukkan stabil di waktu ke 1200 detik, akan tetapi belum sampai berhenti di satu titik, dalam arti kecepatannya masih belum menuju ke nilai 0, begitu juga dengan posisi heave atau kedalaman AUV masih terus bergerak sampai ke titik 30 m. pada Gambar 4.6a dan 4.6b yang menunjukkan grafik kecepatan dan posisi pada gerak pitch. Hal ini menunjukkan bahwa kontroler NMPC mampu untuk mengestimasi dan menggiring kedalaman ke titik tertentu, meskipun belum sampai menuju ke titik 0 (titik referensi kecepatan gerak heave) pada model nonlinier MARES AUV.

BAB 5

KESIMPULAN

Dari analisa dan pembahasan yang telah dilakukan yaitu penerapan metode NMPC pada MARES AUV diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada tesis ini ditunjukkan strategi kontrol NMPC yang digunakan untuk kontrol gerak dari AUV dengan efek arus yang konstan. Model nonlinear dari MARES AUV direduksi menjadi 3 DOF untuk mendefinisikan model dinamika error. Model tersebut digunakan oleh algoritma NMPC untuk mendapatkan nilai keluaran yang sesuai dengan referensi yang diberikan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa implementasi NMPC yang diusulkan dapat menggiring error kedalaman menuju 0 di waktu ke 1200 detik, sehingga hal ini membuktikan bahwa NMPC secara efektif dapat digunakan pada model nonlinear dengan multi input dan multi output.
2. Dengan menggunakan algoritma NMPC untuk *time varying reference* x^{ref} dengan estimasi posteriori suboptimalitas, dapat diketahui nilai derajat estimasi suboptimal yang dapat menunjukkan performa dari kontroler, selain itu nilai tersebut digunakan sebagai tuning parameter kontroler seperti horizon kontrol dan running cost. Nilai derajat estimasi suboptimal yang didapatkan adalah bernilai negatif atau kurang dari nol, hal ini dapat diatasi dengan menaikkan nilai horizon kontrol dalam rangka untuk menaikkan nilai derajat estimasi suboptimal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ferreira, Bruno; Anibal Matos, and Nuno Cruz. *Fault Tolerant Depth Control of the MARES AUV*. Intech. 2011
- [2] Liu, J.; M. E. Furlong; A. Palmer. *Design and Control of a Flight-Style AUV with Hovering Capability*. UUST 2009. Durham, New Hampshire. 2009
- [3] Elrosa, Ilmiyah. *Nonlinear Model Predictive Control for Nonlinear Systems based on a Takagi-Sugeno Fuzzy Model*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. 2015
- [4] Cruz, Nuno. *Autonomous Underwater Vehicles*. Intech. Croatia : 2011
- [5] Wadoo, Sabiha and Pushkin Kachroo. *Autonomous Underwater Vehicles : Modeling, Control Design, and Simulation*. CRC Press. New York : 2011.
- [6] Schalkoff, Robert J. *Artificial Neural Networks*. McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS. 1997
- [7] Yang, Chen. *Modular Modeling and Control for Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*. National University of Singapore. 2007.
- [8] Ferreira, Bruno, Miguel Pinto, Anibal Matos, and Nuno Cruz. *Control of the MARES AUV*. FEUP-DEEC. Portugal : 2009.
- [9] Khac Duc Do, Jie Pan; *Control of Ships and Underwater Vehicles Design for Underactuated and Nonlinear Marine Systems*. Springer. London : 2009.
- [10] Fossen, Thor I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, First Edition. John Wiley & Sons Ltd. 2011
- [11] Roberts, G.N.; Sutton, R.; *Further Advances in Unmanned Marine Vehicles*, The Institution of Engineering and Technology. United Kingdom : 2012.
- [12] Fossen, Thor I.; *Marine Control Systems Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. Norway : 2002.
- [13] Pratama, Mahardhika; *Genetic Dynamic Fuzzy Neural Network (GDFNN) for Nonlinear System Identification*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011
- [14] Wu, Shiqian and Meng Joo Er. *Dynamic-Fuzzy Neural Network- A Novel Approach to Function Approximation*. IEEE-PART B: Cybernetics, Vol. 30, No. 2. 2000.

- [15] Han, Hong-Gui; Lu Zhang; Ying Hou and Jun-Fei Qiao. *Nonlinear Model Predictive Control Based on a Self-Organizing Recurrent Neural Network*. IEEE Trans. On Neural Networks and Learning Systems. 2015.
- [16] Er, Meng Joo and Aung Min Sia. *Adaptive Noise Cancellation Using Dynamic Fuzzy Neural Networks Algorithm*. 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain. IFAC. 2002
- [17] Merabet, Adel. *Nonlinear Model Predictive Control for Induction Motor Drive*. Frontiers of Model Predictive Control. InTech. 2012
- [18] Fossen, T.I. and A. Ross. *Nonlinear modeling, identification, and control of UUVs*. Advanced in unmanned marine vehicles. 2011.
- [19] Wang, Liuping. *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*. Advances in Industrial Control. Melbourne : 2008.
- [20] Allgower, Frank; Rolf Findeisen, and Christian Ebenbauer. *Nonlinear Model Predictive Control*. Control Systems, Robotics and Automation, Vol. XI. 2005.

LAMPIRAN

Momen Inersia

No	Parameter	Nilai (kg m ²)	Deskripsi
1	I_{xx}	$1.55 \cdot 10^{-1}$	Momen inersia sumbu x_B
2	I_{yy}	$4.73 \cdot 10^0$	Momen inersia sumbu y_B
3	I_{zz}	$4.73 \cdot 10^0$	Momen inersia sumbu z_B

Koefisien Massa Tambahan

No	Parameter	Nilai	Unit
1	$X_{\dot{u}}$	$-1.74 \cdot 10^0$	kg
2	$Y_{\dot{v}}$	$-4.28 \cdot 10^1$	kg
3	$Z_{\dot{w}}$	$-4.12 \cdot 10^1$	kg
4	$K_{\dot{p}}$	$-8.61 \cdot 10^{-3}$	kg m ²
5	$M_{\dot{q}}$	$-6.07 \cdot 10^0$	kg m ²
6	$N_{\dot{r}}$	$-6.40 \cdot 10^0$	kg m ²
7	$X_{\dot{q}}$	$-35 \cdot 10^{-2}$	kg m
8	$Y_{\dot{p}}$	$35 \cdot 10^{-2}$	kg m
9	$K_{\dot{v}}$	$35 \cdot 10^{-2}$	kg m
10	$M_{\dot{u}}$	$-35 \cdot 10^{-2}$	kg m
11	$Y_{\dot{r}}$	$1.13 \cdot 10^{-1}$	kg m
12	$Z_{\dot{q}}$	$-1.23 \cdot 10^{-1}$	kg m
13	$M_{\dot{w}}$	$-1.23 \cdot 10^{-1}$	kg m
14	$N_{\dot{v}}$	$1.13 \cdot 10^{-1}$	kg m

Koefisien *viscous damping*

No	Parameter	Nilai	Unit
1	$X_{u u }$	$-45 \cdot 10^0$	kg m ⁻¹
2	$Y_{v v }$	$-1.16 \cdot 10^2$	kg m ⁻¹
3	$Z_{w w }$	$-1.16 \cdot 10^2$	kg m ⁻¹
4	$K_{p p }$	$-7.02 \cdot 10^{-4}$	kg m ²
5	$M_{q q }$	$-1.56 \cdot 10^1$	kg m ²
6	$N_{r r }$	$-1.25 \cdot 10^1$	kg m ²
7	$X_{q q }$	$-4.84 \cdot 10^{-2}$	kg m

8	$Y_{p p }$	$4.84 \cdot 10^{-2}$	kg m
9	$K_{v v }$	$2.11 \cdot 10^{-1}$	kg
10	$M_{u u }$	$-2.11 \cdot 10^{-1}$	kg
11	$Y_{r r }$	$1.83 \cdot 10^0$	kg m
12	$Z_{q q }$	$-5.95 \cdot 10^0$	kg m
13	$M_{w w }$	$-8.26 \cdot 10^0$	kg
14	$N_{v v }$	$2.13 \cdot 10^0$	kg

Koordinat posisi *thruster*

No	Parameter	Nilai (m)
1	x_{p1}	$-7.47 \cdot 10^{-1}$
2	y_{p1}	$-1.08 \cdot 10^{-1}$
3	z_{p1}	$-1.20 \cdot 10^{-3}$
4	x_{p2}	$-7.47 \cdot 10^{-1}$
5	y_{p2}	$1.08 \cdot 10^{-1}$
6	z_{p2}	$-1.20 \cdot 10^{-3}$
7	x_{p3}	$-4.21 \cdot 10^{-1}$
8	y_{p3}	0
9	z_{p3}	0
10	x_{p4}	$4.34 \cdot 10^{-1}$
11	y_{p4}	0
12	z_{p4}	0

RIWAYAT HIDUP

Anindya Dwi Risdhayanti lahir di Malang tanggal 11 September 1990 merupakan putri kedua dari Bp. Ir. Tarmukan, MT. dan Ibu Sri Wahyuni Mursidah. Saat ini penulis telah menikah dengan Mochammad Nur Handoyo. Penulis saat ini telah bekerja sebagai tenaga pengajar di Politeknik Negeri Malang.

Riwayat Pendidikan :

- SD Dharmawanita Malang lulus tahun 2002
- SMPN 18 Malang lulus tahun 2005
- MAN 3 Malang lulus tahun 2008
- Universitas Brawijaya Malang Jurusan Teknik Elektro bidang studi Kontrol lulus tahun 2013
- Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Elektro, bidang studi Teknik Sistem Pengaturan lulus tahun 2017

Pada tanggal 9 Juni 2017 penulis telah mengikuti sidang tesis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik