

## PERANCANGAN PERGERAKAN ROBOT BAWAH AIR

**Andi Adriansyah**

Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana  
Jl. Raya Meruya Selatan, Kembangan, Jakarta Barat 11650  
[andi@mercubuana.ac.id](mailto:andi@mercubuana.ac.id)

### **Abstrak**

*Teknologi dan aplikasi robot terus berkembang secara cepa. Akan tetapi, perancangan robot harus mengatasi beberapa masalah. Kompleksitas dan ketidaktahuan yang sempurna tentang lingkungan dan situasi yang akan dihadapi, kemampuan untuk mempresepsikan keadaan berdasarkan informasi yang didapati dari sensor yang terkadang tidak akurat, dan kemampuan mengambil keputusan tentang pergerakannya dalam waktu yang terbatas adalah contohnya. Di sisi lain, kebutuhan terhadap penelitian bawah air cukup tinggi. Oleh karena itu, tulisan ini berupaya untuk membahas perancangan robot bawah air yang lebih baik demi mengatasi masalah-masalah yang disebutkan di atas. Perancangan ini difokuskan kepada kemampuan robot untuk bermanuver dan bergerak dengan efektif di bawah air. Agar manuver dan pergerakan robot efektif, maka diajukan suatu arsitektur pengendali tertentu, yaitu arsitektur pengendali robot berbasis perilaku. Beberapa eksperimen akan dilakukan untuk menguji efektifitas manuver dan pergerakan robot bawah air ini.*

**Kata Kunci:** robot, robot bawah air, arsitektur pengendali, pengendali berbasis perilaku

### **1. PENDAHULUAN**

Teknologi dan aplikasi robot terus berkembang secara cepat, baik dari sisi kehandalan, jangkauan kemampuan dan bidangnya maupun harganya (Nehmzow, 2000). Di dalam teknologi robot, tergabung beberapa tema-tema penelitian yang juga berkembang, seperti teknologi sensor, teknologi motor, teknologi suplai daya, teknologi telekomunikasi, teknologi pengendalian dan teknologi kecerdasan buatan. Perkembangan masing-masing teknologi tersebut saling menyempurnakan untuk mendukung kemajuan teknologi robot. Oleh karena itu, riset di bidang teknologi robot menjadi topik yang memiliki daya tarik yang cukup kuat bagi para peneliti (Moravec, 1983).

Akan tetapi, perancangan robot pada umumnya adalah sebuah kegiatan yang amat menantang. Kompleksitas dan ketidaktahuan yang sempurna tentang lingkungan dan situasi yang akan dihadapi oleh robot adalah suatu kebutuhan yang rumit baik bagi komponen perangkat keras robot maupun perangkat lunaknya. Robot juga harus memiliki kemampuan untuk mempresepsikan keadaan berdasarkan informasi yang didapati dari sensor yang terkadang tidak akurat. Selain itu, robot juga harus mampu mengambil keputusan tentang pergerakannya dalam waktu yang terbatas (Nehmzow, 2000).

Di sisi lain, kebutuhan terhadap penelitian bawah air cukup tinggi, khususnya bagi negara-negara yang daerah perairannya memiliki cakupan yang luas, seperti Indonesia. Beberapa urgensi penelitian bawah air, antara lain adalah: kebutuhan terhadap pemeliharaan sumber-sumber air bersih dari pencemaran, pencarian potensi laut dalam, kajian arkelologi bawah air, penyelidikan sains samudera, pemetaan dan pengukuran bawah air, sehingga kepada tingginya kebutuhan terhadap kajian-kajian untuk melakukan penyelamatan bawah air. Hal ini menyebabkan kegiatan penelitian robot bawah air menjadi salah satu bidang teknologi robot yang penting dan terus berkembang pula.

Namun, kegiatan penelitian robot bawah air memiliki beberapa kendala untuk dapat dilakukan secara intensif. Kendala terbesar penelitian robot bawah air adalah masalah finansial. Keperluan dana yang cukup besar, khususnya untuk pembelian peralatan yang mendukung teknologi robot, telah menghambat kegiatan penelitian di bidang ini. Pada sisi yang lain, penelitian robot bawah air difokuskan kepada aplikasi tertentu, sehingga bentuk dan skala robot menjadi sangat besar. Akibatnya, keperluan terhadap suplai tenaga yang besar menjadi suatu kendala. Selain itu, seringkali riset-riset robot bawah air lebih ditekankan kepada kemampuan robot untuk berada di bawah air dalam waktu tertentu. Sehingga, kemampuan robot untuk bermanuver dan bergerak dengan efektif di bawah air terabaikan.

Oleh karena itu, tulisan ini berupaya untuk membahas perancangan robot bawah air yang lebih sederhana demi mengatasi masalah-masalah yang disebutkan di atas. Perancangan ini difokuskan kepada kemampuan robot untuk bermanuver dan bergerak dengan efektif di bawah air. Agar manuver dan pergerakan robot efektif, maka diajukan suatu arsitektur pengendali tertentu, yaitu arsitektur pengendali robot berbasis perilaku. Beberapa eksperimen akan dilakukan untuk menguji efektifitas manuver dan pergerakan robot bawah air ini.

## 2. ROBOT DAN ARSITEKTUR PENGENDALI

Awal pekerjaan perancangan robot ditunjukkan dengan beberapa kemampuan dasar robot, seperti kemampuan untuk mengenali lingkungannya pada robot Standford's CART dan HILARE (Giralt dkk, 1984), kemampuan untuk merencanakan menyelesaikan tugas-tugas sederhana pada robot SRI's SHAKEY (Fikes dkk, 1972), hingga keberhasilan untuk bergerak pada lingkungan yang tidak terstruktur pada robot yang bekerja di luar ruangan, seperti NAVLAB (Thorpe, 1990).

Kerja-kerja penelitian diatas pada akhirnya menghasilkan bidang baru dalam teknologi robot, yaitu perencanaan algoritma pengekseskuan robot, teknik-teknik untuk mempresepsikan lingkungan yang dilalui oleh robot dan arsitektur perangkat lunak untuk mengintegrasikan dan mengendalikan sistem robot yang semakin kompleks. Beberapa tahun setelah itu, perancangan robot semakin melangkah maju, seperti robot FLAKEY (Saffiotti, 1993), KHEPERA (Mondada dkk, 1994), atau XAVIER (Simmons dkk, 1997).

Selain itu, jangkauan pengembangan aplikasi robot juga semakin luas. Selain dimanfaatkan di dunia industri, robot juga telah digunakan di dunia kedokteran, penambangan dan mineral, kajian ruang angkasa dan penelitian bawah air. Beberapa robot bawah air yang telah dikembangkan antara lain Autonomous Underwater Vehicle (AUV) di Massachusetts Institute of Technology (MIT), Amerika, dan Unmanned Underwater Vehicle (UUV) di Uni Sovyet pada tahun 1970, Remotely Operated Vehicle (ROV) oleh Kyowa Concrete Industry Company Limited di Jepang, atau 'ikan robot' di Cina. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian robot bawah air merupakan bidang teknologi robot yang juga terus berkembang.

Salah satu bidang yang mendukung pesatnya penelitian di bidang teknologi adalah perkembangan arsitektur pengendali robot (*robot control architecture*). Arsitektur pengendali robot membentuk tulang punggung dari sistem robot yang kompleks dan sempurna (Coste dkk, 2000). Arsitektur pengendali menyediakan beberapa prinsip-prinsip untuk mengorganisasikan sistem pengendali pada robot yang menjelaskan bagaimana sistem robot tersebut dibagi menjadi beberapa sub-sub sistem, dan menjelaskan sub-sub sistem tersebut berinteraksi serta menggambarkan konsep algoritma dan komputasi yang digunakan sistem tersebut secara keseluruhan. Beberapa arsitektur pengendali robot telah dikembangkan, antara lain arsitektur pertimbangan (*deliberative control architecture*), arsitektur reaktif (*reactive control architecture*), arsitektur hibridisasi (*hybrid control architecture*) dan arsitektur berbasis perilaku (*behavior-based control architecture*) (Arkin, 1998) (Mataric, 1997) (Mataric, 1998).

## 3. ARSITEKTUR BERBASIS PERILAKU

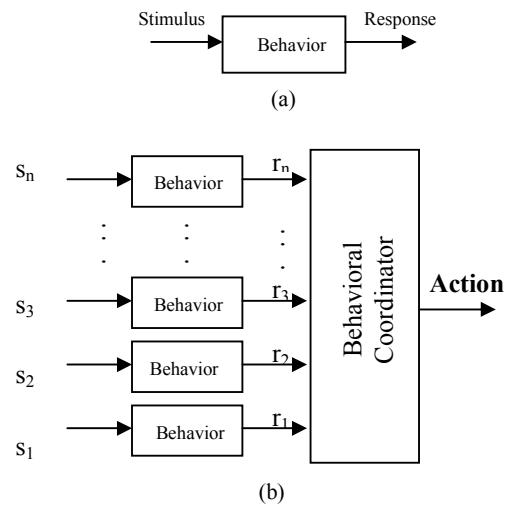
Arsitektur berbasis perilaku (*behavior-based control architecture*) (Arkin, 1989), adalah metode untuk perancangan robot yang ditawarkan pertama kali pada arsitektur *subsumption* (Brooks, 1986). Pendekatan metode ini diinspirasi oleh struktur umum sistem biologi makhluk hidup, yaitu sistem yang berasaskan pada falsafah dari bawah ke atas (*bottom-up philosophy*), dimana tugas-tugas robot dibagi ke dalam beberapa kerja-kerja kecil yang harus diselesaikan oleh robot pada satu waktu tertentu. Kerja-kerja kecil itu disebut dengan perilaku (*behavior*) (Mataric, 1998). Setiap perilaku akan mendapatkan input berupa stimulus yang berasal dari sensor-sensor robot dan kemudian akan menghasilkan output yang akan dikirimkan ke setiap aktuator robot berupa respon dari robot. Setelah itu, sebuah koordinator perilaku (*behavior coordinator*) diperlukan untuk mengkoordinasikan perilaku-perilaku yang aktif pada waktu yang bersamaan, sehingga dapat dihasilkan satu respon tertentu. Koordinator ini memegang peranan penting untuk mengkombinasikan perilaku-perilaku yang terkadang mengalami konflik pada suatu keadaan tertentu.

Struktur dasar arsitektur pengendali berbasis perilaku digambarkan pada Gambar 1 di bawah ini. Prinsip-prinsip penting arsitektur pengendali berbasis perilaku yang membuatnya menjadi alternatif dibanding arsitektur pengendali lainnya adalah: *parallelism, modularity, situatedness, embodiment, dan emergence* (Arkin, 1989).

Beberapa *behavior* yang biasanya terdapat pada sebuah robot antara lain adalah: menuju target (*goal seeking*), mengikut dinding (*wall following*), menghindari rintangan (*obstacle avoiding*) dan kembali ke tempat semula (*homing*).

## 4. PERANCANGAN ROBOT

Secara umum robot bawah air akan dirancang dalam bentuk silinder. Robot ini akan digerakkan menggunakan 4 (empat) buah motor DC untuk dapat melakukan gerakan sekaligus mempertahankan posisinya di kedalaman tertentu. Pada sisi yang lain, sebuah rangkaian pengendali dipersiapkan sebagai pemberi perintah bagi robot untuk mengambil keputusan pergerakan sesuai dengan kondisi yang ada.

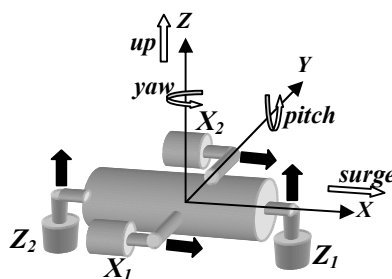


**Gambar 1** Arsitektur Pengendali Berbasis Perilaku (a) Sebuah Perilaku (b) Sistem Berbasis Perilaku

**4.1. Bentuk dan Dimensi Robot**

Perancangan robot ini diinspirasi dari robot sebelumnya, yaitu DRIPP (Miller, 1996) dan URIS, dengan beberapa modifikasi dan penyesuaian dilakukan. Badan robot dirancang berbentuk silinder dengan panjang 44.5 cm dan berdiameter 12 cm. Bahan badan robot terbuat dari PVC ringan dengan ulir pada bagian depan dan belakang. Hal ini dirancang agar memudahkan perancangan/perawatan rangkaian elektronika yang diletakkan pada bagian dalamnya. Komponen lainnya, seperti 4 (empat) buah motor dan beberapa sensor, diletakkan di luar badan robot. Semua komponen yang terletak pada bagian luar dirancang agar tahan terhadap air (*water proof*), dimana semua koneksi elektrik telah terlindungi dengan kabel teselubung dan sistem hermetik.

Gambar 2 di bawah ini menunjukkan gambar rancangan dan posisi robot terhadap bidang koordinat. Berdasarkan bidang koordinat tersebut, terdapat 6 (enam) derajat kebebasan (*degree of freedom, DOF*), dimana robot dapat bergerak sebagai berikut: maju ke depan (*surge*), miring ke samping (*sway*) dan mengapung ke atas (*up*) mengikuti arah sumbu X, Y dan Z dan berputar (*roll*), menaik (*pitch*) dan membelok (*yaw*) mengikuti putaran sumbu X, Y dan Z pula.



**Gambar 2.** Skema Robot Bawah Air

Berat robot diasumsi mampu membuat keseluruhan robot untuk tenggelam, sehingga pengontrolan akan diprioritaskan untuk menangani gaya ke bawah (*bouyancy*). Pusat gravitasi terdapat pada pertengahan badan robot, sehingga hal ini akan menciptakan kestabilan robot pada saat gerakan *pitch* dan *roll*.

**4.2. Pergerakan Robot**

Pergerakan robot sepenuhnya bergantung pada pergerakan 4 (empat) buah motor DC. Keempat motor tersebut adalah 2 (dua) motor,  $X_1$  dan  $X_2$ , yang terletak searah dengan sumbu X dan 2 (dua) motor yang lain,  $Z_1$  dan  $Z_2$ , terletak searah dengan sumbu Z.

Motor  $X_1$  dan  $X_2$  digunakan untuk memberikan gaya sepanjang sumbu  $X$  dan torsi pada sumbu  $Z$ . Resultan gaya dari kedua motor ini bertanggungjawab terhadap pergerakan ke depan (*surge*) robot, sedangkan resultan torsinya bertanggungjawab terhadap pergerakan membelok (*yaw*).

Analogi dengan pergerakan di atas, maka gaya sepanjang sumbu  $Z$  dan torsi pada sumbu  $Y$  bergantung pada motor  $Z_1$  dan  $Z_2$ . Pergerakan ke atas (*up*) merupakan resultan gaya dari kedua motor tersebut, sedangkan pergerakan menaik (*pitch*) merupakan resultan torsi.

Dari pergerakan 4 (empat) motor tersebut, dapat dinyatakan bahwa robot hanya memiliki 4 (empat) derajat kebebasan, dengan meniadakan gerakan ke samping (*sway*) dan berputar (*roll*). Dengan kata lain, robot ini berlaku sebagai *non-holonomic robot*. Gerakan-gerakan lain dapat dilakukan dengan mengatur kombinasi dari keempat gerakan dasar di atas.

### 4.3. Sistem Kontrol dan Penggerak Robot

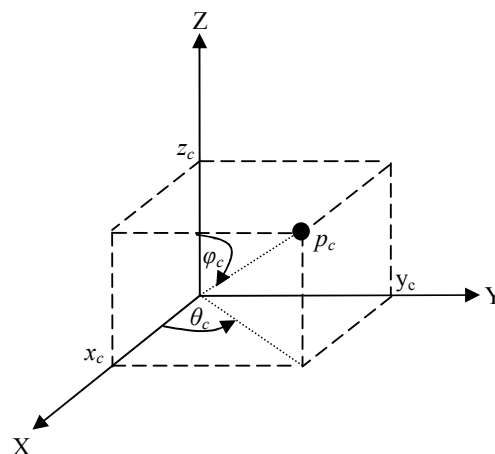
Keseluruhan rangkaian elektronika akan diletakkan di dalam badan robot dan ditata dalam beberapa bagian. Bagian awal adalah perlengkapan yang berhubungan dengan suplai tenaga, yang terdiri dari beberapa baterai dan rangkaian pengatur tegangan. Setelah itu adalah bagian penggerak yang terdiri dari beberapa relai untuk menggerakkan 4 (empat) buah motor. Bagian terakhir ditempati oleh komponen utama, yaitu rangkaian mikrokontroler.

Mikrokontroler yang digunakan adalah mikrokontroler berjenis AVR ATmega 8535 yang telah memiliki beberapa fasilitas pendukung bagi pengendalian sistem secara keseluruhan. Sebagaimana dikatakan sebelumnya, mikrokontroler mengendalikan 4 (empat) buah penggerak (*actuator*) untuk melakukan pergerakan 4 (empat) derajat kebebasan, yaitu: ke depan (*surge*), membelok (*yaw*), ke atas (*up*) dan menaik (*pitch*). Setiap *actuator* dilengkapi oleh sebuah motor DC yang telah dibuat tahan air dan telah menyatu dengan propelernya. Pada sekitar propeler ditambahkan dipasangkan silinder terbuka untuk meningkatkan efisiensi pergerakan robot. Motor yang digunakan adalah motor fan JMC Datech 12 Volt/2 A.

### 4.3. Model Pergerakan Robot

Tujuan klasik dari perancangan robot adalah agar robot tersebut dapat melakukan manuver di area tertentu dengan baik. Beberapa tes biasanya dilakukan untuk menginvestigasi performa dari robot tersebut. Oleh karena itu, beberapa peneliti bekerja untuk membangun model matematika pergerakan robot dan lingkungannya. Kemudian performa robot tersebut dapat dianalisa melalui simulasi komputer dari model yang telah ada [7].

Maka, berdasarkan perancangan di atas, model robot dapat diturunkan dengan memandang robot sebagai sebuah titik pada bidang 3 dimensi koordinat cartesius dengan koordinat global  $\{X, Y, Z\}$ . Robot memiliki 5 (lima) parameter posisi yang direpresentasikan sebagai  $p_c = \{x_c, y_c, z_c, \theta_c, \varphi_c\}$ , dimana  $(x_c, y_c, z_c)$  adalah posisi spasial robot pada sistem koordinat global serta  $(\theta_c, \varphi_c)$  adalah masing-masing sudut arah robot terhadap sumbu  $X$  dan sumbu  $Z$ . Prinsip ini ditampilkan pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Koordinat XYZ sebagai Daerah Kerja Robot

Model matematika diturunkan berdasarkan inspirasi dari sistem pergerakan *differentially drive* robot bergerak 2 dimensi (Lucas, 2000) dan (Dudek and Jenkin, 2000). Sistem ini berasaskan 2 (dua) buah motor yang

ditempatkan pada aksis bersama dan dikendalikan secara terpisah. Perbedaan kecepatan pada kedua motor tersebut akan menghasilkan resultan gaya dan resultan rotasi tertentu yang membuat robot bergerak secara translasi dan rotasi. Pergerakan ini akan mengakibatkan robot akan memiliki kecepatan translasi,  $v$ , dan kecepatan rotasi,  $\omega$ , yang beragam.

Berdasarkan perancangan diatas, terdapat 2 (dua) pasang motor yang akan menghasilkan 2 (dua) pasang kecepatan, yaitu: kecepatan translasi  $v_1$ , dan  $v_2$ , serta kecepatan rotasi  $\omega_1$  dan  $\omega_2$ , dimana  $v_1$  dan  $\omega_1$  adalah kecepatan motor  $X_1$  dan  $X_2$  serta  $v_2$  dan  $\omega_2$  adalah kecepatan motor  $Z_1$  dan  $Z_2$ . Pendistribusian kecepatan ke masing-masing sumbu  $XYZ$  untuk setiap pasangan kecepatan adalah:

$$\begin{aligned}v_{1x} &= v_1 \cos \theta \cos \varphi \\v_{1y} &= v_1 \sin \theta \cos \varphi \\v_{1z} &= v_1 \sin \varphi\end{aligned}\tag{1}$$

dan

$$\begin{aligned}v_{2x} &= v_2 \sin \varphi \cos \theta \\v_{2y} &= v_2 \sin \theta \\v_{2z} &= v_2 \cos \varphi \cos \theta\end{aligned}\tag{2}$$

Dengan menganggap bahwa posisi robot adalah  $p_c = (x_c, y_c, \theta_c)$ , maka posisi robot berikutnya adalah:

$$\begin{aligned}x_{c+1} &= x_c + v_{1x} + v_{2x} \\y_{c+1} &= y_c + v_{1y} + v_{2y} \\z_{c+1} &= z_c + v_{1z} + v_{2z} \\ \theta_{c+1} &= \theta_c + \omega_1 \\ \varphi_{c+1} &= \varphi_c +\end{aligned}\tag{3}$$

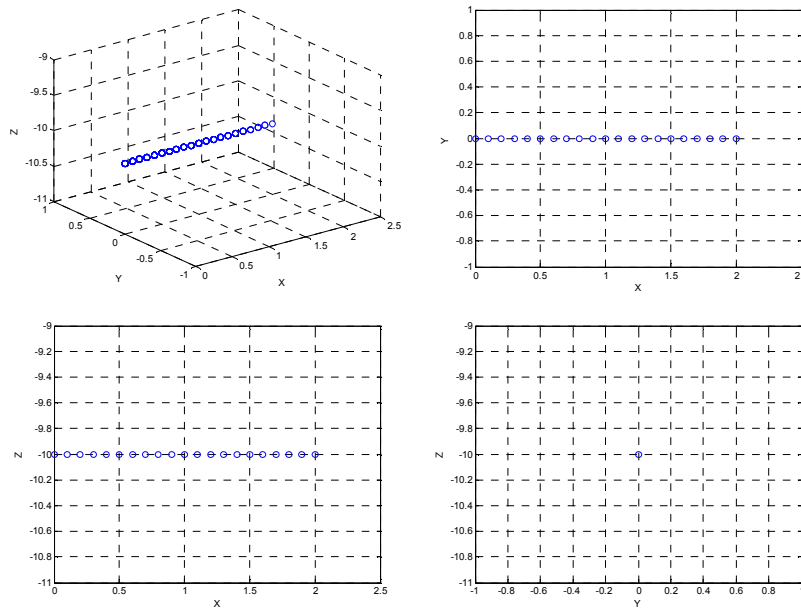
Bagian berikut ini akan membahas simulasi komputer pergerakan robot bawah air berdasarkan model matematika yang didapat dari persamaan (1) hingga (3) diatas.

## 5. HASIL SIMULASI KOMPUTER

Simulasi komputer robot dapat digunakan sebagai pendekatan awal sebuah perancangan robot sebenarnya dan dapat dimanfaatkan sebagai sebuah gambaran bagi proses pengumpulan dan penganalisaan data pergerakan robot. Akan tetapi, verifikasi performa robot yang efektif hanya dapat dicapai dengan menggunakan robot yang sebenarnya. Adalah sebuah keniscayaan untuk merealisasikan percobaan teknologi pengembangan robot dengan robot yang sebenarnya.

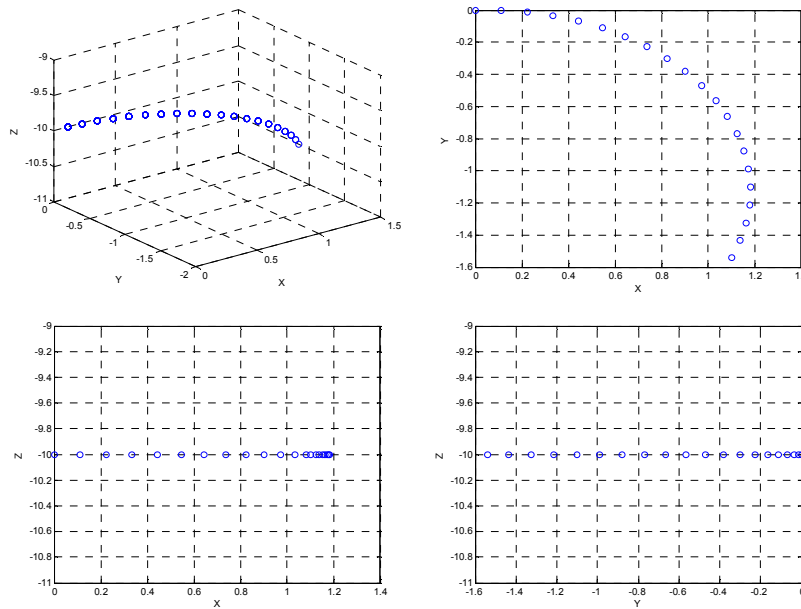
Ketika tulisan ini ditulis, penelitian masih terus berjalan. Hasil yang akan ditampilkan adalah hasil eksperimen berupa simulasi komputer robot bawah air. Eksperimen dilakukan dengan cara mensimulasikan model matematika robot bawah air yang telah dibahas di atas. Perangkat lunak MATLAB Versi 6.5 Release 13 akan digunakan untuk mensimulasikan persamaan-persamaan tersebut. Hasil simulasi akan ditampilkan berupa visualisasi pergerakan robot bawah air.

Pada bagian awal, eksperimen dilakukan untuk menguji gerakan-gerakan dasar robot, seperti: *surge*, *yaw*, *up* dan *pitch*. Posisi awal robot diasumsikan berada pada koordinat  $\{-10, 0, 0, 0, 0\}$ . Gambar 4 menunjukkan pergerakan *surge* robot dimana robot bergerak secara translasi,  $v_1$ , searah dengan sumbu  $X$ . Pergerakan ini terjadi dengan hanya mengaktifkan pasangan motor  $X_1$  dan  $X_2$  dengan kecepatan dan arah yang sama. Untuk mempermudah penganalisaan, gambar 3 (tiga) dimensi dipadukan dengan gambar 2 (dua) dimensi per bidang  $XY$ , bidang  $XZ$  dan bidang  $YZ$ .



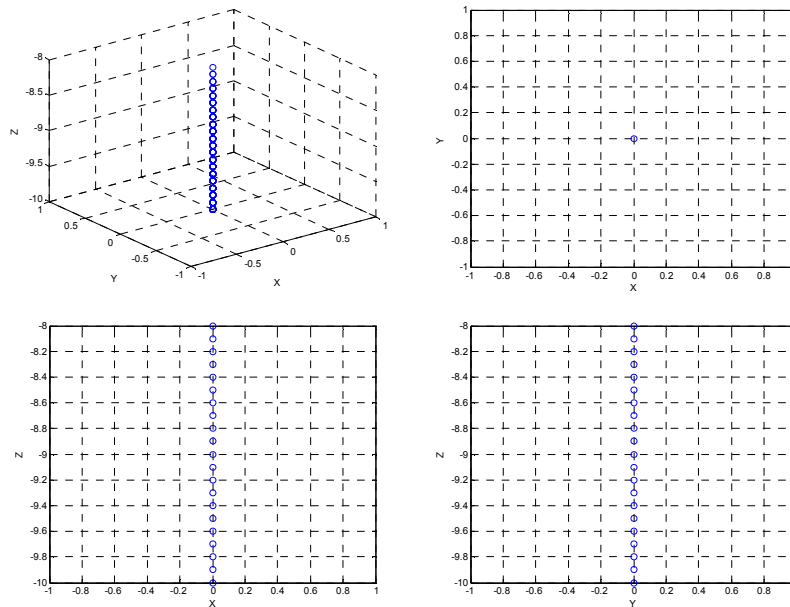
Gambar 4. Pergerakan Surge

Pergerakan robot yang ditampilkan pada Gambar 5 adalah adalah pergerakan *yaw*, yaitu pergerakan rotasi robot yang bertumpu pada sumbu Z. Pergerakan ini terjadi dengan dengan mengaktifkan motor  $X_1$  dan  $X_2$  dengan kecepatan yang berbeda, dimana kecepatan motor  $X_2$  lebih besar dari  $X_1$ . Akibatnya, terjadi kecepatan rotasi,  $\omega_1$ , dengan arah ke kanan.

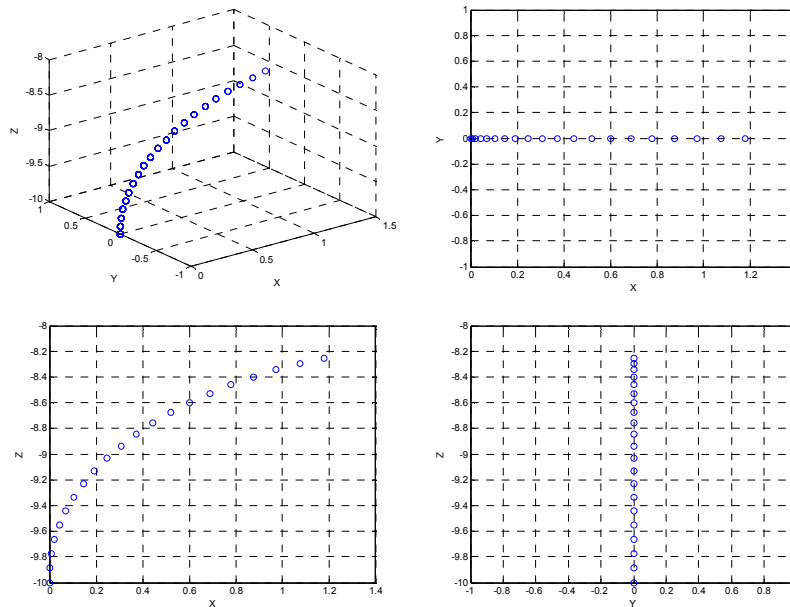


Gambar 5. Pergerakan Yaw

Sebagaimana pada gambar-gambar sebelumnya, Gambar 6 dan Gambar 7, masing-masing memperlihatkan pergerakan robot *up* dan *pitch*. Hal ini didapat dengan mengatur kecepatan motor  $Z_1$  dan  $Z_2$ . Jika kecepatan keduanya sama, akan didapat pergerakan *up* dengan kecepatan translasi,  $v_2$ , searah dengan sumbu Z. Sedangkan jika kecepatannya berbeda akan terjadi pergerakan *pitch* dengan kecepatan rotasi,  $\omega_2$ , berporoskan sumbu X.

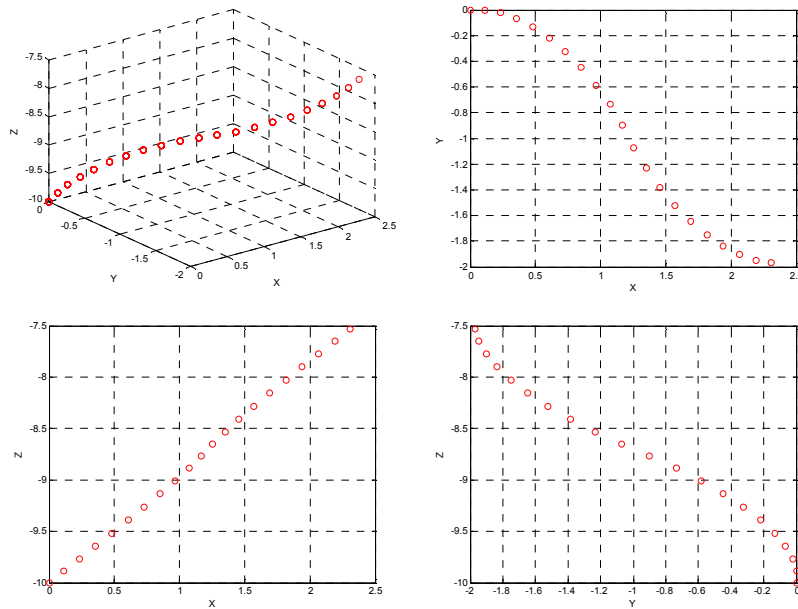


Gambar 6. Pergerakan *Up*



Gambar 7. Pergerakan *Pitch*

Jika kedua pasangan motor tersebut dikombinasikan, maka akan terjadi pergerakan yang lebih kompleks dan bervariasi. Gambar 8 di bawah ini menunjukkan pergerakan robot yang merupakan kombinasi dari pergerakan-pergerakan dasar. Pada bagian awal gambar tersebut, tampak bahwa robot bergerak *pitch* dan *yaw* sekaligus, sehingga robot menaik dan berputar ke kanan. Kemudian, arah *pitch* dan *yaw* diubah berlawanan, sehingga robot bergerak ke bawah dan berputar ke kiri secara bersamaan. Selain itu, pergerakan robot dan transisi antar gerakannya tampak halus (*smooth*) sebagai bukti pengendaliannya dapat diandalkan.



Gambar 8. Pergerakan Kombinasi

## 6. KESIMPULAN

Pada paper ini, peran penting penelitian robot bawah air telah disampaikan. Selain itu, kebutuhan arsitektur pengendali robot dan jenisnya juga telah dibahas. Arsitektur pengendali robot berbasis perilaku termasuk arsitektur pengendali yang andal untuk diaplikasikan pada robot-robot bergerak. Karakteristik robot bawah air, meliputi bentuk, dimensi, pengontrolan dan pergerakannya telah dirancang. Kemudian, untuk dapat menganalisa pergerakannya, model matematika pergerakan robot bawah air telah diturunkan. Setelah itu, model tersebut disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB Versi 6.5 Release 13. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pergerakan robot, baik pergerakan dasar maupun kombinasinya memiliki karakteristik yang andal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arkin, R.C. (1998) *Behavior-based Robotics*. Cambridge, England: The MIT Press.
- Brooks, R.A. (1986). A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotic and Automation*, 2(1), March 1986. 14-23.
- Coste-Maniere, E. and Simmons, R. (2000). Architecture, the Backbone of Robotic Systems. *Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA. April 2000. 67-72.
- Fikes, R., Hart, P. and Nisllon, N. (1972). Learning and executing generalized robot plans. *Artificial Intelligence* 3: 1-4.
- Giralt, G., Chatila, R. And Vaisset, M. (1984). An Integrated Navigation and Motion Control System for Autonomous Multisensory Mobile Robotics. In Brady, M. and Paul, R.P. (Eds.), *1<sup>st</sup> International Symposium on Robotics Research*. MIT Press, Cambridge. 191-214.
- Mataric, M.M. (1997). Behavior-Based Control: Examples from Navigation, Learning, and Group Behavior. *Journal on Experimental and Theoretical Artificial Intelligence Special Issue on Software Architectures for Physical Agents*. 9(2-3): 323-326.
- Mataric, M.M. (1998) Behavior-based Robotics as a Tool for Synthesis of Artificial Behavior and Analysis of Natural Behavior. *Trends in Cognitive Science*. Vol. 2. No. 3, March 1998: 82-87.
- Miller, D. P. (1996). Design of a Small, Cheap UUV for Under-Ship Inspection and Salvage. *Proceeding of Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, June 1996. 18-20.
- Mondada, F., Franzi, E., and lenne, P. (1994). Mobile robot miniaturization: A tool for investigation in control algorithms. In Yoshikawa, T. and Miyazaki, F. (Eds.) *Proceeding of the Third International Symposium on Experimental Robotics*. Kyoto, Japan: Springer Verlag. 501-513.
- Moravec, H. (1983) The Stanford Cart and the CMU Rover. *Proceeding of the IEEE*, 71: 872-884.
- Nehmzow, U. (2000). *Mobile Robotics: A Practical Introduction*. London: Springer-Verlag.
- Nehmzow, U. (2001). *Mobile Robotics: Research, Applications and Challenges*, *Proceeding of Future Trends in Robotics*, Institution of Mechanical Engineer, London, UK. 2001.



- Saffiotti, A. (1993) Some notes on the Integration of Planning and Reactivity in Autonomous Mobile Robots  
*Proceeding of the AAAI Spring Symposium on Foundation of Automatic Planning*. Stanford University. C.  
122-126.
- Simmons, R.G., Goodwin, R., Haigh, K. Z., Koenig, S., O'Sullivan, J. and Veloso, M. M. (1997). Xavier:  
Experience with a Layered Robot Architecture . *ACM Magazine Intelligence*. 22-33.
- Thorpe, C. (1990). *Vision and Navigation: The Carnegie Mellon Navlab*. (Ed). Norwel, MA: Kluwer Academic  
Publishers.