

6 족 해저보행로봇을 위한 정적 보행 알고리즘 설계

유승열^{*†} · 전봉환^{*} · 심형원^{*}

* 선박해양플랜트연구소

Design of Static Gait Algorithm for Hexapod Subsea Walking Robot: Crabster

Seong Yeol Yoo^{*†}, Bong Huan Jun^{*} and Hyungwon Shim^{*}

* Korea Research Institute of Ship and Ocean engineering,

(Received May 29, 2014 ; Revised July 9, 2014 ; Accepted July 17, 2014)

Key Words: Crabster(크랩스터), Static Gait(정적보행), Omni-Directional Gait(전방위 보행), Subsea Walking Robot(해저보행로봇)

초록: 본 논문에서는 6 족 다관절 해저로봇 크랩스터를 위한 정적 보행 알고리즘 설계 방법에 대하여 기술하였다. 정적 보행 알고리즘 설계를 위해 보행계획 벡터와 다리쌍 벡터의 개념을 도입하여 6 족 로봇 보행기법 설계의 편의성과 확장성을 확보하고, 이를 이용하여 수중환경이나 탐사조건에 따라 운용할 수 있는 여섯 가지 정적 보행기법을 설계하였다. 그리고, 공통 제어변수를 사용하여 각 보행 간 자유로운 연동과 자세제어와의 복합보행을 수행할 수 있도록 하였다. 설계된 여섯 가지 정적 보행기법은 시뮬레이션을 통하여 확인하였고, 크랩스터에 적용하여 보행기법 간 연동성과 복합보행 기능 등을 검증하였다.

Abstract: In this paper, we describe a design method for the static walking algorithm of a subsea hexapod robot called Crabster (CR200). To design the gait algorithms of a hexapod robot, we propose a design method that uses a gait schedule vector and leg pair vector to secure convenience and expandability. Several walking algorithms are designed that are capable of being applied to CR200 according to the underwater environment and explorative conditions. In addition, gait transition is freely performed between algorithms by applying common control parameters to them. The gait algorithms designed using the proposed method are simulated using MATLAB and validated against the results of experiments.

1. 서 론

최근 해양 자원에 대한 관심이 증가하는 가운데 해양 장비에 대한 필요성도 함께 대두되고 있다. 여러 가지 해양 장비 중 수중로봇은 해양 탐사 및 자원 개발에 있어서 반드시 필요한 장비이다.

현재까지 개발되어 운용되고 있는 수중로봇은 대부분 스크류 형태의 추진기를 이용하여 이동하며 탐사를 진행하고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 스크류 형태의 구동기를 이용하면 운용속도 측면에서 커다란 이점이 있지만 강한 조류가 있는 수중환경에서는 정확한 위치제어가 어려울 뿐 아니라 운용속도 측면에서의 장점도

사라지게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위한 대안 중 하나가 크랩스터(CR200)와 같은 다리를 이용한 수중 보행로봇이다.^(5,6)

CR200 은 기존의 수중로봇과는 달리 스크류 형태의 추진기 대신 여섯 개의 다리가 장착되어 있으며, 여섯 개의 다리를 이용하여 해저면을 지나 가재처럼 기어다닐 수 있다. 그리고 우리나라 서해와 같은 강조류 환경에서는 자세를 움추리거나 낮추어 전복안정성을 높여 강한 조류를 극복할 수 있도록 설계되었다.

본 연구에서는 CR200 을 강조류 악시계 환경에서 운용하기 위한 보행기법 중 주기적 정적 보행에 대하여 기술하고자 한다. CR200 은 여섯 개의 다리를 가지고 있기 때문에, 2 족, 4 족 로봇과는 달리 보행기법이 다양하고 상대적으로 높은 보행 안정성을

† Corresponding Author, usyool@kriso.re.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

확보할 수 있지만, 많은 다리를 제어해야 하기 때문에 보행기법의 설계가 복잡하다. CR200의 보행 방법은 아래와 같이 크게 연속 보행과 불연속 보행으로 나눌 수 있고 각각 3 점, 4 점 5 점 지지 보행으로 다시 구분된다.

- 불연속 보행
 - 3 점지지 보행
 - 4 점지지 보행
 - 5 점지지 보행
- 연속 보행
 - 3 점지지 보행
 - 4 점지지 보행
 - 5 점지지 보행

3 점지지 보행은 여섯 개의 다리 중 세 개의 다리를 동시에 이동하는 보행기법으로서 가장 빠른 보행이다. 4 점지지 보행은 두 개의 다리가 동시에 움직여 보행하는 기법이며, 5 점지지 보행은 한 개의 다리씩 움직이는 가장 느린 보행기법이다. 또한 연속/불연속 보행은 다리와 몸체를 동시에 움직이거나 다리가 움직인 후 몸체가 움직이는 기법이다. 이 외에도 CR200이 수중에서 탐사 및 작업을 수행하거나 조류극복을 위해서는 보행뿐 아니라 자세제어 기능도 필요하다. 자세제어는 여섯 개의 다리를 모두 지면에 고정한 상태에서 Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw 등 자세를 바꾸는 방법으로 수중 작업 및 탐사의 자유도를 높여줄 수 있다.

그 동안 많은 다족 로봇의 보행기법에 관한 연구들이 수행되었다. 4 족 로봇의 정적보행과 전이에 관한 연구,⁽⁷⁾ 4 족 로봇의 동적 보행기법에

관한 연구가 수행되었고,⁽⁸⁾ 6 족 로봇의 CPG 방법을 이용한 보행기법간 전이연구,⁽⁹⁾ 6 족 로봇의 비평탄 지형에서의 보행 기법,⁽¹⁰⁾ 6 족 로봇의 다리 고장 시 보행 제어⁽¹¹⁾ 등의 연구들이 수행되었다. 하지만, 모두 육상로봇에 대한 연구들이며, 보행기법 설계가 복잡하여 새로운 보행기법의 추가나 변경이 어려웠다. 본 논문에서는 이러한 기존 보행기법 설계의 단점을 극복하기 위하여 보행계획 벡터와 다리쌍 벡터의 개념을 도입하였다. 이 방법은 각 다리에 인덱스를 부여하고 이를 이용한 보행계획 벡터와 동시에 구동하는 다리 인덱스를 표현하는 다리쌍 벡터를 조합하여 보행기법의 설계가 단순한 보행계획 벡터 변경을 통해 가능하도록 한 것이다. 이를 통해 6 족 로봇의 보행 알고리즘 설계의 편의성과 확장성을 확보하였고, 공통제어변수를 사용하여 각 알고리즘간 자연스러운 전이가 이루어질 수 있도록 하였으며, 자세제어와 연동하여 해저에서의 탐사자유도를 높이는 복합보행을 수행할 수 있도록 하였다. 이러한 방법으로 설계된 CR200의 보행기법을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

2. CR200의 좌표계 시스템

Fig. 2는 CR200의 구동을 위해 설정된 좌표계를 나타낸다. CR200의 좌표계는 고정 좌표계(ground coordinate), 몸체 중심 좌표계(Body coordinate), 회전 중심 좌표계(Rotation coordinate)로 구성된다. 고정 좌표계는 전체 좌표계의 기준 좌표계로서 CR200이동의 기준좌표가 되며, 몸체 중심 좌표계는 CR200이 보행할 때 몸체의 기준 좌표를 나타내며, 회전 중심 좌표계는 CR200의 자세제어 시 몸체가 회전하는 기준좌표계가 된다. 몸체 중심 좌표계는 CR200의 몸체에 고정되어 있지만, 회전 중심 좌표계는 원점을 이동시켜 몸

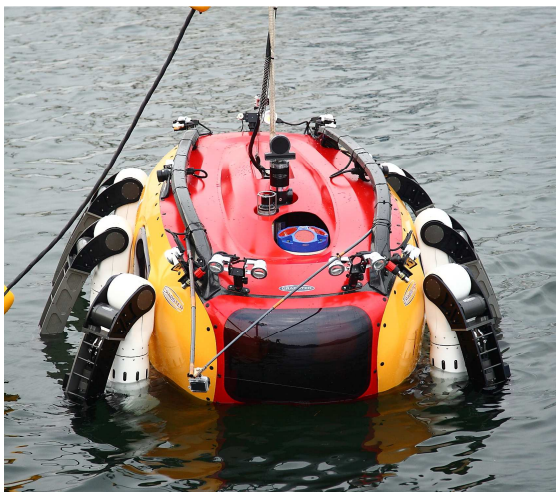


Fig. 1 Multi-legged subsea walking robot, Crabster

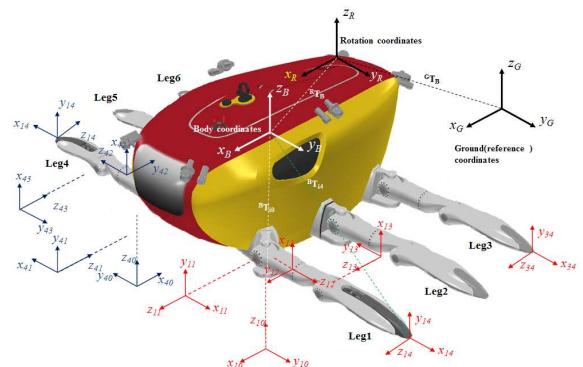


Fig. 2 Coordinate system of CR200

체 회전의 중심을 바꿔 수중 작업의 효율성을 높일 수 있도록 하였다. 다리의 각 발 끝점은 몸체 중심 좌표계로부터 순기구학과 역기구학을 통해 발끝점 좌표와 각 관절의 각도를 구할 수 있다.

CR200의 보행 및 자세제어는 몸체 중심 좌표계와 다리 끝 좌표계 사이의 관계를 이용해 각 다리의 관절각들을 산출하여 다리의 위치 및 자세를 제어한다. 이 때, 몸체 중심에서 각 다리 끝점의 좌표는 순기구학을 이용하며, 각 다리의 관절각은 역기구학을 이용하여 구해진다. 몸체 중심 좌표계에서 i 번째 다리 끝 좌표계로의 변환행렬을 ${}^B T_{i4}$ 라고 하고 몸체 중심 좌표계에서 i 번째 다리의 베이스 좌표계로의 변환행렬을 ${}^B T_{i0}$ 라 하면 다리의 베이스 좌표계에서 다리 끝 좌표계로의 변환행렬 ${}^{i0} T_{i4}$ 에 의해 몸체 중심에서의 다리 끝점 좌표는 식 (1)과 같이 표현된다.

$${}^B T_{i4} = {}^B T_{i0} {}^{i0} T_{i4} = {}^B A_{i0} {}^{i0} A_{i1} {}^{i1} A_{i2} {}^{i2} A_{i3} {}^{i3} A_{i4} \quad (1)$$

$${}^B T_{i0} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & {}^B p_{i0} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^B p_{i0} = [{}^B x_{i0} \quad {}^B y_{i0} \quad {}^B z_{i0}]^T \quad (2)$$

$${}^{i(j-1)} A_{ij} = \begin{bmatrix} c\theta_{ij} & -c\alpha_{ij}s\theta_{ij} & s\alpha_{ij}s\theta_{ij} & \alpha_{ij}c\theta_{ij} \\ s\theta_{ij} & c\alpha_{ij}c\theta_{ij} & -s\alpha_{ij}c\theta_{ij} & \alpha_{ij}s\theta_{ij} \\ 0 & s\alpha_{ij} & c\alpha_{ij} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (2)의 ${}^B p_{i0}$ 는 몸체 중심 좌표계에서 정의되는 i 번째 다리 베이스 좌표계의 위치 벡터이며, 식 (3)은 다리 관절 사이의 변환 행렬을 나타낸다. 이 때, CR200의 보행 및 자세제어는 각 다리의 네 개 관절만을 이용하여 수행되기 때문에 두 개 앞다리의 5~7 관절은 고려하지 않는다.

3. 정적 보행 알고리즘 설계

3.1 직선 보행 설계

CR200의 정적 보행은 여섯 개의 다리를 일정한 보행 계획에 따라 제어하여 이루어지며, 보행 계획은 보행기법에 따라 다르게 설계된다. CR200의 정적 보행은 크게 연속 보행과 불연속 보행으로 나눌 수 있으며 각각 3점, 4점, 5점지지 보행으로 다시 나뉜다. 연속 보행은 다리와 몸체가 동시에 움직이는 기법을 의미하고, 불연속 보행은 다리가 움직인 후 몸체가 움직이는 기법이다. 3점지지 보행은 보행 중 세 개의 다리가 몸체를 지지하는 보행기법이며, 4점지지 보행은 네 개의 다리가, 5점지지 보행은 다섯 개의 다리가 보행 중 몸체를 지지하는 보행기법이다.

CR200의 정적 보행의 설계는 보행 다이어그램을 이용하여 수행한다. Fig. 3은 CR200의 보행기법 중 불연속 5점지지 보행의 보행 다이어그램을 보여준다. 다이어그램에서 볼 수 있듯이 불연속 5점지지 보행은 총 8 단계로 이루어져 있으며, $t_0 \sim t_2$ 동안 1, 5, 3번 다리가 차례로 이동하고, t_3 에서 몸체를 움직이기 위해 전 다리가 이동한다. 다시 $t_4 \sim t_6$ 동안 4, 2, 6번의 다리가 차례로 이동한 후 마지막 t_7 에서 몸체가 움직임으로서 전체 보행한 주기가 마무리 된다. 보행 설계의 편의성을 위하여 각 다리마다 번호를 부여하여(좌측다리 : 1, 2, 3; 우측다리 : 4, 5, 6) 다리의 제어순서를 의미하는 인덱스 조합 벡터인 다리쌍 벡터 L_{pair} 를 정의하고, 이를 이용하여 전체 보행의 순서를 조절하는 보행계획 벡터 S^{lin} 를 구성하였다. S^{lin} 의 요소는 직선보행의 단계, 즉 L_{pair} 의 행을 나타내며, 몸체 이동의 단계는 다리쌍 벡터의 마지막 행 번호의 다음 번호로 정의하고, 다리 제어 계획과는 별도로 제어한다. 불연속 5점지지 보행의 경우 L_{pair} 는 식 (4)와 같고, S^{lin} 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$L_{pair}^5 = [1 \ 5 \ 3 \ 4 \ 2 \ 6]^T \quad (4)$$

$$S_{5d}^{lin} = [1 \ 2 \ 3 \ 7 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7] \quad (5)$$

다리쌍 벡터 L_{pair}^5 의 윗첨자는 5점지지 보행을 의미하며, 보행기법에 따라 3, 4로 바뀔 수 있으며, S_{5d}^{lin} 의 윗첨자 lin 은 직선보행을, 아래첨자 $5d$ 는 불연속 5점지지 보행을 의미한다. 보행계획 벡터의 윗첨자는 보행의 종류에 따라 바뀔 수 있으

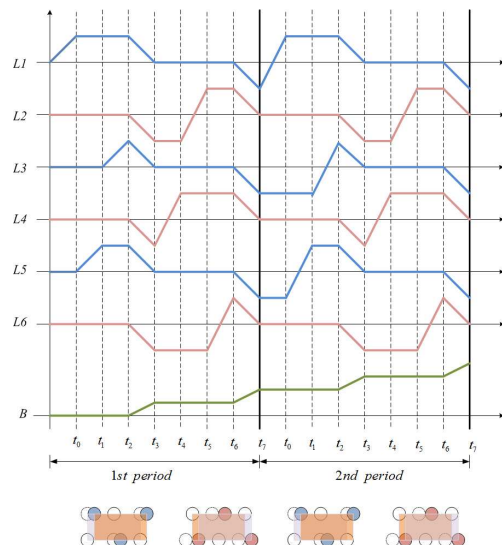


Fig. 3 Discontinuous pentapody gait diagram

며, 아래첨자는 보행기법에 따라 3c, 3d 연속/불연속 3 점지지 보행, 4c, 4d 연속/불연속 4 점지지 보행 등으로 바뀔 수 있다.

보행 시 CR200 의 무게중심의 이동을 최소화하기 위하여 다리의 이동은 왼쪽과 오른쪽을 교대로 수행하였다. 보행 계획을 수립한 후에는 각 다리의 이동 방법과 보폭을 결정해야 한다. 각 다리의 보폭은 상수 S_t 로 정의하고, 다리와 몸체의 이동은 cosine 함수를 이용하여 다리의 궤적을 생성하여 수행하며, 다리와 몸체 이동 시 궤적 생성은 식 (6)에 의해 이루어진다.(7)

$$\begin{aligned}
 P_{Li4}^k \Big|_{x,y,z} &= f_{leg\ or\ body} \left(P_{Li4}^{des} \Big|_{x,y,z}, P_{Li4}^{pre} \Big|_{x,y,z}, t^k, T \right) \\
 &= P_{Li4}^{pre} \Big|_{x,y,z} + 0.5S_t \left(1 - \cos \left(\frac{n\pi}{T} t^k \right) \right) \\
 &\begin{cases} x, y : n=1 \\ z(leg) : n=2 \\ z(body) : n=0 \end{cases} \quad (6) \\
 S_t &= P_{Li4}^{des} \Big|_{x,y,z} - P_{Li4}^{pre} \Big|_{x,y,z}
 \end{aligned}$$

이 때, P_{Li4}^k 는 $t=k$ 일 때 몸체좌표계에서 바라본 i 번째 다리 끝의 위치를 의미하며, P_{Li4}^{des} 는 목표 위치, P_{Li4}^{pre} 는 현재 위치, T 는 다리 하나의 이동이 완료되는 시간을 의미한다. 그리고, n 은 다리 끝 점의 좌표 중 x, y 좌표의 궤적을 생성할 때는 1 이며, z 좌표의 경우 다리 이동 시에는 2, 몸체 이동 시에는 0 으로 정의된다. CR200 의 보행은 식 (6)에서 보듯이 현재 위치와 목표 위치를 이용하여 이루어지기 때문에 목표 위치의 좌표에 따라서 전후좌우 보행을 비롯한 대각 보행(전좌, 전우, 후좌, 후우)도 동일한 알고리즘으로 수행할 수 있다.

CR200 의 정적 보행은 불연속 5 점지지 보행 외에도 다섯 개의 보행기법을 추가적으로 구현하였다. 앞에서 언급했듯이, 5 점 지지 보행을 제외한 3 점, 4 점 지지 보행은 두 개 혹은 세 개의 다리를 동시에 제어해야 하기 때문에 L_{pair} 가 5 점 지지 보행과는 다르게 설계되어야 하며, 3 점과 4 점 지지 보행의 다리쌍 벡터 L_{pair} 는 식 (7)과 같다. L_{pair} 는 연속 보행과 불연속 보행에 있어 동일하게 설계된다.

$$L_{pair}^3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 6 \end{bmatrix}, L_{pair}^4 = \begin{bmatrix} 1 & 5 \\ 2 & 6 \\ 3 & 4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이 때, L_{pair} 의 윗첨자는 지지보행의 종류(3/4/5 점지지)를 나타낸다. 다리쌍 벡터와는 달리 보행 계획 벡터 S^{lin} 는 연속 보행과 불연속 보행이 서로 상이하며 이는 보행기법의 차이에서 기인한다. 연속 보행의 경우 불연속 보행과는 달리 몸체를 움직이는 구간이 별도로 존재하지 않아 불연속 보행과 비교하여 보행 계획이 두 단계 혹은 세 단계 적게 설계되며 식 (8)과 같이 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S_{3c}^{lin} &= [1\ 2] & S_{4c}^{lin} &= [1\ 2\ 3] & S_{5c}^{lin} &= [1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6] \\
 S_{3d}^{lin} &= [1\ 3\ 2\ 3] & S_{4d}^{lin} &= [1\ 4\ 2\ 4\ 3\ 4]
 \end{aligned} \quad (8)$$

3.2 회전보행

CR200 의 회전보행 역시 연속 회전보행과 불연속 회전보행으로 나뉘며, 회전 시 지지하는 다리의 개 수에 따라 3 점, 4 점, 5 점지지 회전보행으로 분류된다. CR200 의 회전보행은 기본적으로는 직선보행과 동일한 다리 궤적 함수를 이용하여 수행된다. 회전보행 중 불연속 회전보행은 직선 보행과는 달리 다리의 이동이 모두 끝난 후 몸체의 이동을 수행한다. 그렇기 때문에 불연속 5 점지지 회전보행의 보행계획 벡터는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며, 다리의 이동 순서는 직선보행과 같은 방법으로 진행되기 때문에 다리쌍 벡터 L_{pair} 는 동일하다.

$$S_{5d}^{rot} = [1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7] \quad (9)$$

회전보행은 다리의 이동과 몸체의 이동으로 구분되어 수행된다. 다리 이동 궤적은 직선보행의 다리 궤적 함수인 식 (6) 중 다리에 관한 경우를 이용할 수 있지만, 몸체의 회전은 별도의 궤적 함수를 적용한다. 회전보행의 몸체 회전은 항상 몸체 중심 좌표계를 중심으로 이루어지기 때문에 식 (10)과 같이 회전행렬을 이용하여 몸체의 회전을 수행하였다.

$$P_{Li4}^k \Big|_{x,y,z} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{rot} & -\sin \theta_{rot} & 0 \\ \sin \theta_{rot} & \cos \theta_{rot} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_{Li4}^{des} \Big|_{x,y,z} \quad (10)$$

회전보행의 보행계획 벡터 역시 동일한 방식으로 설계가 가능하며 보행별 계획 벡터는 식(11)와 같이 설계하였다.

$$\begin{aligned}
 S_{3c}^{rot} &= [1\ 2] & S_{4c}^{rot} &= [1\ 2\ 3] & S_{5c}^{rot} &= [1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6] \\
 S_{3d}^{rot} &= [1\ 2\ 3] & S_{4d}^{rot} &= [1\ 2\ 3\ 4]
 \end{aligned} \quad (11)$$

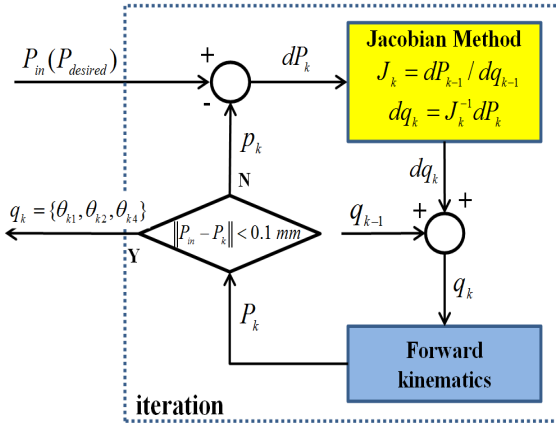


Fig. 4 Numerical inverse kinematics method

3.3 자세제어

CR200의 자세제어는 로봇에 장착된 수중 탐사 장비에 추가적인 여유자유도를 부여한다는 측면에서 큰 의미가 있다. CR200의 자세제어는 여섯 개의 다리가 모두 해저면을 지지하고 있을 때를 가정으로 이루어지며 로봇팔 겸용 다리를 이용하여 작업을 할 경우 네 개의 전용다리로 몸체를 지지하고, 자세를 변환할 수도 있으나, 본 논문에서는 제외하였다.

CR200의 자세제어는 로봇의 기구학적 파라미터를 기반으로 수행된다. 2장의 식 (1)에서 정의된 각 다리 끝 좌표계는 몸체 중심 좌표계에서의 상대 좌표계이다. 이를 위치가 변하지 않는 고정 좌표계가 포함되도록 변환하면 식 (12)와 같이 정의될 수 있다.

$${}^B T_{i4} = ({}^G T_B)^{-1} {}^G T_{i4} = ({}^G T_B)^{-1} {}^G T_B^{init} {}^B T_{i4}^{init} \quad (12)$$

식 (12)의 ${}^G T_{i4}^{init}$ 는 고정 좌표계에서 몸체 중심 좌표계로의 초기 변환 행렬이며, ${}^B T_{i4}^{init}$ 는 몸체 좌표계에서 i 번째 다리 끝 좌표계로의 초기 변환 행렬이다. 또한 각 다리 끝의 좌표계가 회전 중심 좌표계도 함께 포함하도록 하기 위해서 식 (12)의 ${}^G T_B$ 에 고정 좌표계에서 회전 중심 좌표계로의 초기 변환 행렬 ${}^G T_R^{init}$ 과 회전 중심 좌표계에서 몸체 중심 좌표계로의 변환 행렬 ${}^R T_B$ 를 이용하여 식 (13)과 같이 변환하였다.

$${}^G T_B = {}^G T_R^{init} {}^R T_B = {}^G T_B^p {}^B T_R^{init} {}^R T_B \quad (13)$$

$${}^G T_B^p = \begin{bmatrix} {}^G R_B & {}^G P_B \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^G P_B = [{}^G x_B \quad {}^G y_B \quad {}^G z_B]^T \quad (14)$$

식 (14)의 ${}^G T_B^p$ 는 자세 변환 시 고정 좌표계에

서 바라본 몸체 중심 좌표계의 위치 변위 ${}^G p_B$ 가 고려된 변환 행렬이며, ${}^R T_B$ 는 몸체 자세 변화 중 회전 좌표계에서 정의되는 회전 변환(R_{ypr})을 고려하여 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$${}^R T_B = R_{yaw} R_{pitch} R_{roll} {}^R T_B^{init} = R_{ypr} ({}^B T_R^{init})^{-1} \quad (15)$$

$$R_{roll} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi & 0 \\ 0 & s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{pitch} = \begin{bmatrix} c\chi & 0 & s\chi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\chi & 0 & c\chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{yaw} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

식 (12)에 식 (13)와 (15)을 대입하면 자세 변환 시 몸체 중심 좌표계에서 다리 끝 좌표계로의 변환 행렬이 고정 좌표계와 회전 중심 좌표계를 포함하도록 식 (16)과 같이 구해진다.^(12,13)

$${}^B T_{i4} = \left({}^G T_B^p {}^B T_R^{init} R_{ypr} ({}^B T_R^{init})^{-1} \right)^{-1} {}^G T_B^{init} {}^B T_{i4}^{init} \quad (16)$$

식 (16)을 이용하여 CR200의 보행 및 자세 제어를 위한 몸체 중심에서의 다리 끝 위치를 구할 수 있으며, 역기구학을 이용하여 보행 및 자세 제어에 필요한 각 다리의 관절각을 구할 수 있는데, 본 논문에서는 Fig. 4와 같은 수치해석적 역기구학 방법을 도입하여 관절각을 산출하였다.

식 (16)의 자세 변화량에 해당하는 인자에 자세의 변위 roll, pitch, yaw, surge, sway, heave의 값인 $dp_B = [d\phi \quad d\chi \quad d\psi \quad dx \quad dy \quad dz]$ 을 대입하면 식 (16)으로부터 원하는 자세를 생성하기 위한 몸체 중심에서의 다리 끝 위치 벡터 $P_{Li4} = [x_{Li4} \quad y_{Li4} \quad z_{Li4}]$ 를 구할 수 있다. 이렇게 구한 P_{Li4} 를 이용하여 수치해석적 역기구학 방법을 통해 원하는 자세 변환을 위한 다리 관절각을 산출하여 CR200의 자세 제어를 수행할 수 있다.

3.4 복합 보행 및 보행기법 간 전이

악시계, 강조류 환경에서 보행과 탐사의 효율성을 높이기 위해서는 앞 절에서 기술된 보행 및 자세제어 기법이 서로 유기적으로 연동되어야

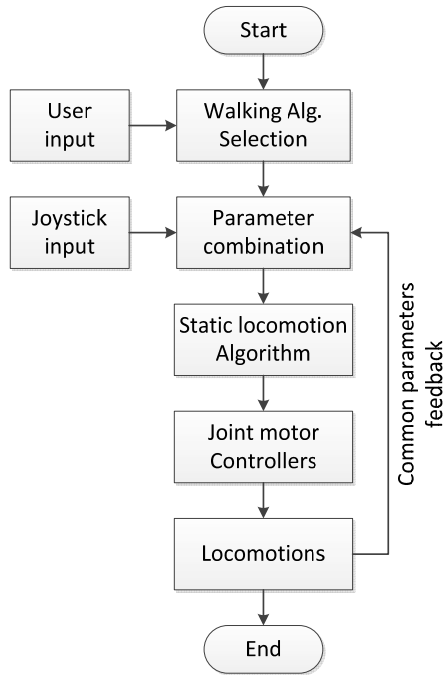


Fig. 5 Flow chart of static walking algorithms

한다. 예를 들어 해저 탐사의 초기 상황에서는 해저지형 및 지물에 대한 정보가 부족하기 때문에 5 점지지 보행과 같은 저속의 보행기법이 유용할 수 있다. 하지만, 해저 지형의 맵핑 작업이 끝나 지형정보를 파악하고 있는 경우에는 빠른 보행기법이 탐사에 도움이 될 것이므로, 빠른 보행으로 기법 전이가 유기적으로 이루어져야 하며, 필요시 자세제어도 함께 이루어져야 할 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 각 보행기법 간 제어변수 공유를 통해 전이성을 확보하였다. Fig. 5 는 CR200 의 정적 보행 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 정적 보행은 사용자의 입력에 따라 해당 보행 알고리즘이 선택된 후, 사용자의 조이스틱 입력에 따라서 직선보행과 회전보행, 자세제어가 수행된다. 선택된 보행기법이 수행 완료되면 공통 제어변수들($\phi, \chi, \psi, {}^B x_{i0}, {}^B y_{i0}, {}^B z_{i0}, P_{Li4}^{last}$)을 공유하여 다른 보행기법이 선택되어도 연속적으로 보행을 수행할 수 있도록 하여 실제 운용환경에서 효율적으로 적용할 수 있도록 하였다. 공통 제어변수들 중 $\phi, \chi, \psi, {}^B x_{i0}, {}^B y_{i0}, {}^B z_{i0}$ 는 각각 회전좌표계에서의 몸체의 오일러각과 몸체 중심 좌표계에서의 몸체의 좌표이며, P_{Li4}^{last} 는 보행 완료 후 현재 위치(달성된 목표위치)를 의미한다.

CR200 의 운용은 원격제어실의 파일럿 PC 를 통해 수행되는데, 파일럿 PC 를 통해 보행 알고리즘이 선택되면, 파일럿의 조이스틱 입력에

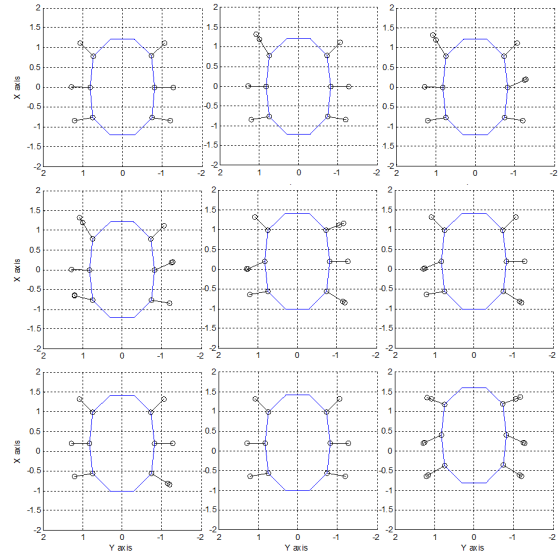


Fig. 6 Discontinuous pentapod gait simulation

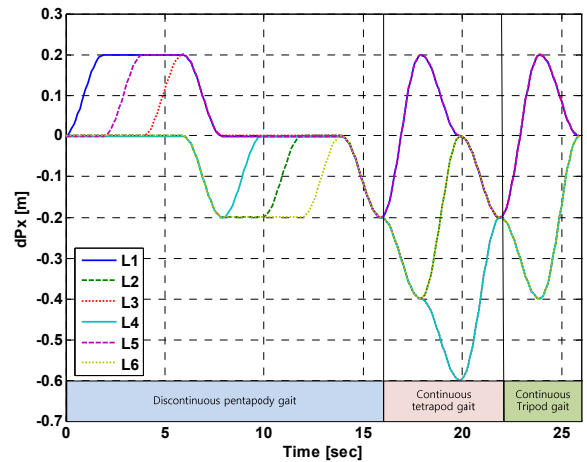


Fig. 7 Gait diagram with transition among different gait algorithms

따라서 직선보행과 회전보행, 자세제어가 수행된다. 선택된 보행이 종료되면 공통변수들을 공유하여 다른 보행기법이 선택되어도 연속적으로 보행을 수행할 수 있도록 하여 실제 운용환경에서 효율적으로 적용할 수 있도록 하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션

본 논문에서는 CR200 의 정적 보행 알고리즘을 검증하기 위하여 MATLAB 을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6 은 설계된 불연속 5 점지지 보행의 전진보행 시뮬레이션 모습을 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 설계된 순서대로 다리의 제어가 이루어지는 것을 알 수 있으며, 1, 5, 3 번 다리의 이동 후 몸체의 이동이 이루어지고 4, 2, 6 번 다리의 이동 후

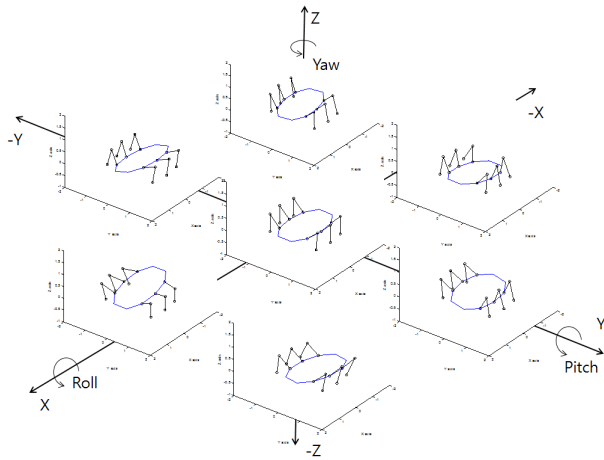


Fig. 8 Posture control simulation (Roll-Pitch-Yaw)

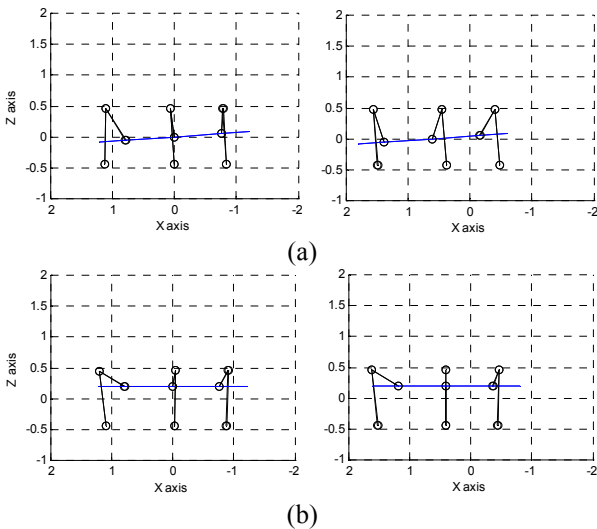


Fig. 9 Mixed gait algorithm simulation; (a) Forward walking with pitch control, (b) Forward walking with heave control

다시 몸체의 이동이 이루어져 8 개의 단계로 불연속 5 점 지지 보행이 구성되어 있음을 알 수 있다. CR200의 정적 보행은 제어 변수 공유를 통해 여러 가지 보행기법 간 전이가 자유롭게 이루어 질 수 있다. Fig. 7의 시뮬레이션 결과는 이러한 CR200의 보행기법의 특징을 잘 보여주고 있다. Fig. 7에서 0 ~ 16 초까지는 불연속 5 점 지지 보행의 보행 다이어그램을 나타낸다. Fig. 3의 보행 다이어그램과 동일한 패턴을 보이는 것을 알 수 있고, 17~22 초 구간에서는 불연속 5 점 지지 보행에 이어서 연속 4 점지지 보행이 수행되는 것을 알 수 있다. 연속 4 점지지 보행은 식 (7)의 L_{pair}^4 를 이용하기 때문에 1-5, 2-6, 3-4 번 다리가 동시에 움직이며, 식 (8)에서 S_{4c}^{lin} 를 이용하기 때문에 보행은 3 단계로 수행된다. Fig. 7의 23 ~ 26 초 구간에서는 연속 4 점 지지

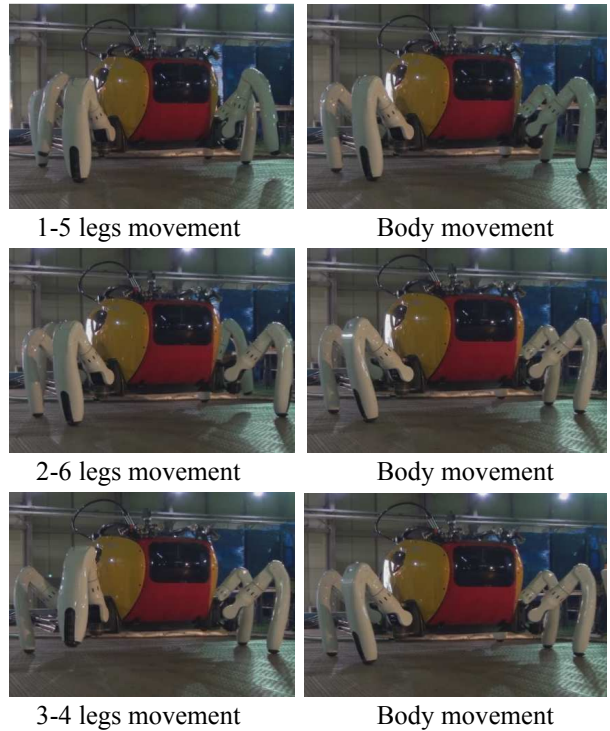


Fig. 10 Experimental picture of walking CR200 using discontinuous tetrapod gait

보행에 이어서 연속 3 점 지지 보행이 수행되는 것을 알 수 있는데, 설계대로 수행됨을 알 수 있다. 시뮬레이션 중 보행 알고리즘의 한 단계 수행시간은 2 초로 세팅하였다.

CR200의 자세제어는 Roll-Pitch-Yaw(ϕ, χ, ψ), Surge-Sway-Heave(x, y, z)와 같이 6 가지 모션으로 구성되며, Fig. 8은 이 중 Roll-Pitch-Yaw의 시뮬레이션을 나타낸다. CR200의 자세제어 중 Roll-Pitch-Yaw 제어는 회전 중심 좌표계를 중심으로 몸체를 회전시키는데, Fig. 8의 시뮬레이션에서는 회전 중심 좌표계를 몸체 중심 좌표계와 일치시킨 후 자세제어를 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 각각 x, y, z 축에 대하여 몸체가 회전되는 것을 알 수 있으며, 이는 수중탐사 중 탐사센서의 자유도를 확장시키는 역할을 할 것이다.

CR200은 강조류 환경을 극복하기 위하여 몸체를 숙여 접지력을 높이거나 몸체를 숙인 채 보행을 수행할 수 있도록 설계되었다. 이를 위해 자세제어와 보행을 함께 수행할 수 있는 복합보행이 필요한데, Fig. 9는 CR200의 복합보행 시뮬레이션을 보여준다. Fig. 9(a)는 강조류 극복을 위해 몸체를 앞으로 숙여 접지력을 높이고 앞으로 전진하는 모습을 보여준다. 이는 우리나라 서해안과 같은 강조류 환경에서 조류를 극복하며

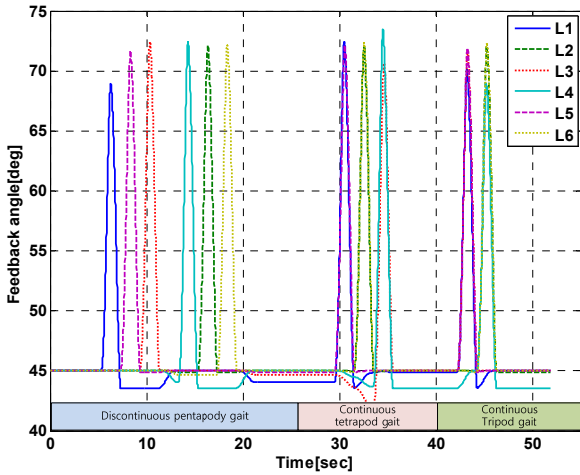


Fig. 11 Feedback angle data of joint 2 of each leg and continuous transition among different gait algorithms

해저 맵핑, 탐사 등의 임무를 수행하는데 있어서 반드시 필요한 기능이라고 할 수 있다. Fig. 9(b)는 로봇의 몸체를 들어 올린 후 보행을 수행하는 모습을 보여준다. 이는 해저면에 존재할 수 있는 장애물을 피해 보행하거나 시야 확보 및 높은 위치에서의 수중작업 수행 등의 임무에 필요한 기능이며, 자세제어와 보행, 두 가지 기법을 동시에 수행하는 복합보행이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

4.2 실험

Fig. 10 은 시뮬레이션을 통해 확인된 CR200 의 보행 알고리즘을 실제 시스템에 구현하여 육상에서 실험하는 모습을 보여준다. Fig. 10 의 모습은 구현된 보행 알고리즘 중 불연속 4 점지지 보행의 모습으로 여섯 개의 다리 중 두 개씩 다리를 움직이며 걷고, 다리와 몸체의 움직임이 시차를 가지는 보행기법이다. 사진에서 두 개의 다리가 동시에 움직이고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 11 은 CR200 이 보행하는 동안 각 다리의 두 번째 관절의 각도값을 보여주고 있으며, 2 관절은 Fig. 2 에서 $xy_{z_{ii}}$ 좌표계의 관절이다. 그림에서 2 관절의 각도는 각 다리에 설치된 엔코더로부터 피드백 된 값이며 Fig. 7 에서와 같이 불연속 5 점지지 보행, 연속 4 점지지 보행, 연속 3 점지지 보행의 순으로 보행 알고리즘이 수행되었을 때 각도의 변화를 나타내고 있다. 불연속 5 점지지 보행 중 2 관절의 움직임이 없는 구간은 몸체가 움직이는 구간이며, 시뮬레이션 결과에서와 같이 실제 시스템에서도 보행기법 간 전이가 무리없이

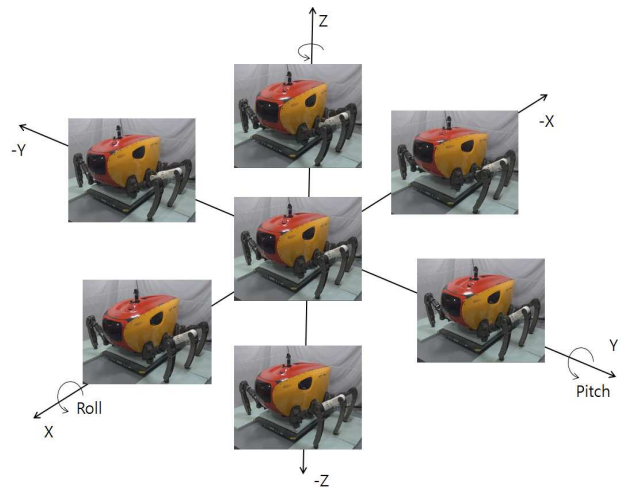


Fig. 12 Posture control experiments (Roll-Pitch-Yaw)

이루어지고 있음을 알 수 있다. 기본자세에서 2 관절의 초기 각도는 45 ° 이며 보행 시 각 다리의 위치에 따라 달라진다. 알고리즘 수행 시 다리 구동 주기는 시뮬레이션과 동일한 2 초로 설정하였고, 실험에서는 알고리즘 간 전이과정에서 알고리즘 선택에 있어 약간의 설정시간이 소요되어 보행기법 간 시간 격차가 존재하였다. Fig. 12 는 CR200 의 자세제어 모습을 보여주고 있다. Roll-Pitch-Yaw 모션에 대하여 시뮬레이션과 동일하게 움직이는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 수심 200 미터급 다관절 복합이동 해저로봇 크랩스터의 강조류 악시계 환경에서 운용하기 위한 보행 기법 중 주기적 정적 보행 기법의 설계에 대하여 기술하였다. 주기적 정적 보행 기법을 설계하기 위하여 좌표계 시스템을 정의하고 각 다리의 공통 보행 패턴을 설계하여, 이를 이용하는 6가지 보행기법을 구현하였다.

보행기법의 설계 및 구현 보행계획 벡터와 다리쌍 벡터의 개념을 도입하여 보행기법 설계 및 구현의 편의성과 확장성을 개선하였다. 또한 공통 제어변수의 공유를 통해 보행 알고리즘 간 전이가 원활하게 이루어지도록 하였으며 자세제어와 보행을 동시에 수행하는 복합보행을 구현하였다. 본 논문에서 설계된 각 보행기법들은 시뮬레이션을 통해 확인하였고, 실험을 통해 검증하였다. 본 논문에서 설계, 구현된 보행 알고리즘은 보행계획 요소당 수행주기를 2초로 하여 전체 보행주기가 불연속 5점지지 보행의

경우 16초로 매우 느리지만, 이는 수행주기를 작게 하면 속도는 개선될 수 있으며 연속 3점지 보행의 경우 보행 속도는 4배 빠르게 운용할 수 있다. 또한 해저 운용 시 해저면의 상황을 정확하게 판단할 수 없는 경우 동적 보행보다 정적 보행을 수행하는 것이 운용 안정성 측면에서 이점이 많기 때문에 현재 정적 보행을 적용하였으며, 추후 부분적으로 동적보행을 적용하여 운용할 계획이다.

후 기

본 연구는 해양수산부에서 지원하는 “다관절 복합이동 해저로봇 개발” 과제로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

참고문헌 (References)

- (1) Shim, H.W., Jun, B.H., Lee, P.M., Baek, H., Lee, J.H., 2010, “Workspace Control System of Underwater Tele-operated Manipulators on an ROV,” *Ocean Engineering*, Vol. 37, pp. 1036~1047.
- (2) Wernli, R., Jaeger, J., 1984, “ROV Technology Update from an International Perspective,” *Proceeding of the MTS/IEEE OCEANS 84*, pp. 639~645.
- (3) Lee, P.M., Jun, B.H., Park, J.Y., Shim, H.S. Shim, Kim, J.S., Jung, H.S., Yoon, J.Y., 2011, “An in-situ Correction Method of Position Error for an Autonomous Underwater Vehicle Surveying the Sea Floor,” *International Journal of Ocean System Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 60~67.
- (4) Loebis, D., Sutton, R., Chudley, J., Naeem, W., 2004, “Adaptive Tuning of Kalman Filter via Fuzzy Logic for an Intelligent AUV navigation System,” *Control Engineering Practice*, Vol. 12, No. 12, pp. 1531~1539.
- (5) Jun, B. H., Shim, H.W., Lee, P.M., 2011, “An Approximation of Generalized Torques by the Hydrodynamic Forces Acting on Legs of Underwater Walking Robot,” *International Journal of Ocean System Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 222~229.
- (6) Yoo, S. Y., Jun, B. H., Shim, H. W. and Lee, P. M., 2014, “Finite Element Analysis of CFRP Frame under Launch and Recovery Conditions for Subsea Walking Robot, Crabster,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 4, pp. 419~425.
- (7) Shugen, M., Takashi, T. and Hideyuki, W., 2005, “Omnidirectional Static Walking of a Quadruped Robot,” *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 21, No. 2, pp.152~161.
- (8) Gonzalez de Santos, P., Garcia, E. and Estremera, Joaquin, 2006, “Quadrupedal Locomotion,” Springer, Verlag London.
- (9) Chen, W., Ren, G., Zhang, J., and Wahn, J., 2012, “Smooth Transition Between Different Gaits of a Hexapod Robot via a Centrol Pattern Generators Algorithm,” *Journal of Intelligent Robot Systems*, Vol. 68, pp.255~270.
- (10) Estremera, J., Cobano, J. and Gonzalez de Santos, P., 2008, “Continuous Free-Crab Gaits for Hexapod Robots on a Natural Terrain with Forbidden Zones : An Application to Humanitarian Demining,” *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 58, pp.700~711.
- (11) Yang, J., 2008, “Omnidirectional Walking of Legged Robots with a Failed Leg,” *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 47, pp.1372~1388.
- (12) Shim, H. W., Lee, K. M., Yoo, S. Y. and Jun, B. H., “Redundancy Generation and Application Method of Underwater Exploration Equipment by Using the Posture Control of CR200,” *Proc. of Kor. Soc. Of Ocean Eng. Conf.*, pp.1743~1746.
- (13) Shim, H. W., Yoo, S. Y., Lee, K. M., Baek, H. and Jun, B. H., 2013, “Posture and Walking Control Method of CR200 for Precise Underwater Exploration,” *Proc. of Kor. Unmanned Underwater Vehicle Conf.*, pp. 114~118.