

관절속도를 가지는 수중로봇팔의 동적 조작도 해석

전봉환* · 이지홍** · 이판묵*

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

**충남대학교 메카트로닉스공학과

Dynamic Manipulability Analysis of Underwater Robotic Arms with Joint Velocities

BONG-HWAN JEON*, JIHONG-LEE**, AND PAN-MOOK LEE*

*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

**Chungnam National University, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Dynamic Manipulability 동적 조작도, Manipulability Measure 조작지수, Underwater Robotic Arm 수중로봇팔, Joint Velocity 관절속도, Hydraulic Drag 유체저항

ABSTRACT: This paper describes dynamic manipulability analysis of robotic arms moving in viscous fluid. The Manipulability is a functionality of manipulator system in a given configuration and under the limits of joint ability with respect to the tasks required to be performed. To investigate the manipulability of underwater robotic arms, a modeling and analysis method are presented. The dynamic equation of motion of underwater manipulator is derived from the Lagrange - Euler equation considering with the hydraulic forces caused by added mass, buoyancy and hydraulic drag. The hydraulic drag term in the equation is established as analytical form using Denavit - Hartenberg (D-H) link coordination of manipulator. Two analytical approaches based on Manipulability Ellipsoid are presented to visualize the manipulability of robotic arm moving in viscous fluid. The one is scaled ellipsoid which transforms the boundary of joint torque to acceleration boundary of end-effector by normalizing the torque in joint space while the other is shifted ellipsoid which depicts total acceleration boundary of end-effector by shifting the ellipsoid in work space. An analysis example of 2-link manipulator with proposed analysis scheme is presented to validate the method.

1. 서 론

1985년 요시가와(Yoshikawa, 1985a)에 의해 로봇팔의 조작지수(Manipulability Measure)와 조작도 타원(Manipulability Ellipsoid)에 의한 조작도 해석방법이 제시된 이후, 조작도 해석은 육상 로봇팔의 해석, 설계, 제어에 다양하게 응용 되어 왔다. 로봇팔의 조작도는 주어진 로봇의 자세에서 각 관절이 발휘할 수 있는 속도 또는 토크 능력의 한계로부터 로봇팔 끝, 즉 작업공구가 장착된 말단효과 장치가 낼 수 있는 능력의 범위를 얻어 내는 것으로 로봇의 기능성에 대한 척도로 사용되며, 여유자유도 로봇팔 제어에 있어서는 특이점 회피, 최적제어 등에 응용되고 있다. 특히, 로봇의 동적 조작도 해석은 주어진 로봇관절의 토크 한계로부터 로봇의 팔 끝이 낼 수 있는 가속도 또는 힘의 한계를 얻어 내는 것으로, 요시가와(Yoshikawa, 1985b)에 의해 단일 로봇팔에 대해서 정의된 후 다중 협동로봇팔의 조작도 해석으로 확장되었다(Lee, 2001). 대부분의 동적 조작도 해석에서 속도항은 계산의 단순화를 위해 영으로 가정되며 해석의 과정에서 중요시하지 않고 있다(Chiacchio, et al., 1991, 1992, 1997). 그러나, 고속으로 작업을 하는 로봇팔이나 점성유체 속에서 움직

이는 로봇의 경우, 속도항이 로봇팔의 조작도에 미치는 영향은 적지 않다. 최근에는 열악한 수중환경에서의 작업에 대한 무인화의 요구가 증대되어 가고 있으며, 이에 따라 무인잠수정과 수중로봇팔에 대한 연구가 늘어나고 있다(Hong et al., 2002). 수중과 같은 점성 유체 속에서 로봇이 움직일 경우, 육상의 로봇에서는 고려되지 않는 외력으로 부가질량에 의한 힘, 유체저항과 양력 그리고 부력에 의한 힘 등이 부가적으로 작용하게 된다. 이중, 유체저항에 의한 힘은 로봇 속도의 제곱에 비례하여 나타나는 힘으로 로봇이 속도를 가지고 움직일 때만 작용하며 육상의 로봇과의 가장 큰 차이 중의 하나이다. 따라서, 수중로봇의 조작도 해석을 위해서는 속도를 고려한 조작도 해석 방법이 고려되어야 하고 수중로봇에 작용하는 유체외력을 고려한 로봇팔의 운동방정식이 적절히 모델링되어야 한다.

로봇팔의 운동에 대한 모델링 방법은 L-E (Lagrange Euler)법과 N-E (Newton Euler)법으로 대별된다(Fu, 1987). L-E 방정식과 D-H (Denavit-Hartenberg) 링크좌표계를 이용하는 전자는 단순하고 체계적이어서 로봇의 운동에 대한 명확한 상태방정식을 제공한다. 반면, 각 링크에 대해 순차적인 반복 계산에 의한 방정식인 후자는 해석적이지는 않지만 계산시간이 짧아 실시간 응용에 널리 활용되고 있다. 복잡한 수중로봇팔의 모델링은 대부분 N-E 방법에 의해 이루어지고 있으나, 로봇팔의 조작도 해석을 위해서는 L-E법이 보다 유리하다.

제1저자 전봉환 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7531 bhjeon@kriso.re.kr

본 논문에서는 유체 속에서 움직이는 로봇팔의 운동방정식을 유도하고 이를 이용한 수중로봇팔의 동적 조작도 해석방법을 제안한다. 로봇팔의 운동방정식은 L-E 방정식에 유체저항을 포함한 유체외력을 포함하여 유도하였다. 동적 조작도 해석은 두 가지 방법으로 수행하였다. 첫 번째는, 요시가와에 의해 제안된 해석법(Yoshikawa, 1985b)에 유체외력을 포함하는 방법이며, 두 번째는 Chiacchio가 중력의 영향을 동적 조작도에 고려한 방법(Chiacchio, 1992)을 응용하여 수중에서 움직이는 로봇팔의 유체저항력을 해석하는 방법이다. 제안된 해석법의 타당성을 확인하기 위하여 단순화된 2절 링크 로봇이 수중에서 움직이는 경우를 상정하여 로봇팔을 모델링하고 두 가지 방법에 대해 각각 해석을 수행하였으며 그 결과를 고찰하였다.

2. 수중로봇팔의 모델링

2.1 로봇팔의 운동방정식

공기 중에서 움직이는 로봇팔의 운동을 q 를 관절변수로 하여 L-E 방법에 의해 기술하면 식 (1)과 같이 기술된다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

여기서, M 은 로봇팔의 관성행렬, C 는 전향력 및 원심력항, G 는 중력항이고, τ 는 로봇팔 관절 토크(generalized torque)이며, 각 항에 대해서는 Fu et al. (1987)에 잘 나타나 있다.

점성유체 속에서 움직이는 로봇팔은 많은 유체외력을 받게 되고 이러한 유체외력을 고려하여 로봇팔의 운동을 기술하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{M}(q)\ddot{q} + \bar{C}(q, \dot{q}) + D(q, \dot{q}) + \bar{G}(q) = \tau \quad (2)$$

여기서, \bar{M} 은 각각 부가질량 항을 포함한 관성행렬, \bar{C} 는 유체 속에서의 전향력 및 원심력, D 는 유체저항 및 양력, 그리고 \bar{G} 는 중력 및 부력 항이다. 식 (2)의 좌변 2, 3 항은 로봇팔의 속도와 관련된 항으로 공기 중 로봇팔의 조작도 해석의 경우는 해석의 단순화를 정지상태를 가정 함으로써 일반적으로 무시된다. 그러나, 로봇팔이 밀도가 큰 점성유체 속에서 움직일 경우, D 항은 로봇팔의 형상과 자세에 따라 무시하기 힘든 크기를 가질 수 있다. 따라서, 수중로봇의 조작도 해석을 위해서는 공기 중의 해석과 가장 큰 차이점의 하나인 D 항을 고려하여야 한다.

2.2 수중로봇팔의 부력

로봇팔이 밀도 ρ 인 유체내에서 운동할 때 각 링크는 링크 체적에 해당하는 유체의 무게만큼의 부력을 받는다. 실린더 링크를 가정하고 부력의 중심이 질량중심과 일치한다고 가정하면 수중에 있는 i 번째 링크에 작용하는 부력은

$$b_i = \frac{1}{4} \rho \pi r_i^2 l_i g \quad (3)$$

가 되므로 이를 중력과 함께 고려하면 i 번째 링크에 작용하는 중력과 부력의 합력은 다음과 같이 쓸 수 있고,

$$\hat{m}_i = (m_i - \rho \pi r_i^2) g \quad (4)$$

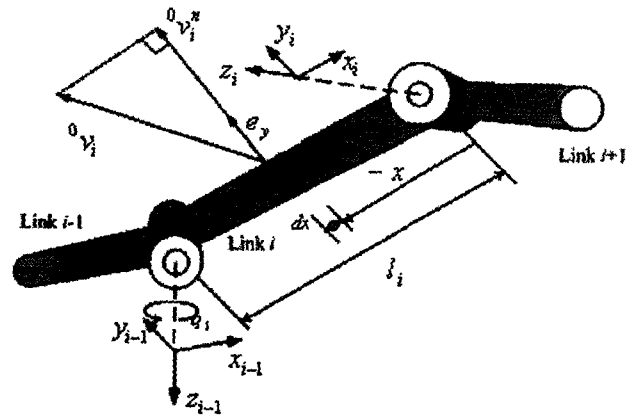


Fig. 1 Link coordinate system of cylinder typed underwater manipulator

식 (4)를 (1)식의 $G(q)$ 항에 대입하면 식 (2)의 $\bar{G}(q)$ 항을 얻을 수 있다.

2.3 유체저항력

밀도가 ρ 인 유체속에서 움직이는 로봇팔은 움직이는 속도와 링크의 형상에 따라 저항력과 양력을 받게 된다. 유체저항력의 모델링을 단순화 하기 위해 Fig. 1과 같이 로봇팔의 링크를 실린더로 가정한다. 또한, 각각의 링크 운동에 의한 유체 유동의 상호간섭이 없다고 가정하고, 유체의 용기는 충분히 큰 것으로 가정한다. Fig. 1과 같이 i 번째 링크를 폭이 dx 인 원판조각으로 나누고, i 좌표계로부터 $-x$ 만큼 떨어진 원판의 기준좌표계에서 본 유체에 대한 상대 속도를 0v_i 라 하고, 원판의 테두리에 수직인 성분을 ${}^0v_i^n$ 라 하면, 원판이 받는 유체저항력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dd_i = \text{sign}({}^0v_i^n) \rho C_D r_i |{}^0v_i^n|^2 dx \quad (5)$$

여기서, $\text{sign}(\cdot)$ 은 부호추출 함수이고, r_i 와 C_D 는 각각 링크의 반지름과 유체저항 계수이다. $|{}^0v_i^n|$ 은 ${}^0v_i^n$ 의 크기를 나타내는 스칼라량이며 ${}^0v_i^n$ 는 기준좌표계에서 본 i 번째 좌표계의 y 축 방향의 단위 벡터와의 내적에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|{}^0v_i^n| = v_i^T {}^0A_i e_y \quad (6)$$

여기서, $e_y = [0 \ 1 \ 0]^T$ 은 i 번째 링크에 고정된 i 좌표계에서 본 자신의 y 축 방향의 단위벡터이고, 0A_i 는 기준좌표계에서 i 번째 좌표계로의 좌표변환 행렬이다. 이제 (5)식을 관절변수 q 와 \dot{q} 의 함수로 나타내기 위해 다음과 같은 정의를 도입한다(Fu, 1987).

$$U_y = \frac{\partial}{\partial q_j} {}^0A_i = \begin{cases} {}^0A_{j-1} Q^{j-1} A_i, & \text{for } j \leq i \\ 0, & \text{for } j > i \end{cases} \quad (7)$$

여기서 Q 는 회전관절의 경우 다음과 같이 정해진다.

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

그러면, 원판의 속도는 기준좌표계에서 i 링크 상의 한점 0r_i 의 속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$${}^0v_i = \sum_{j=1}^i U_{ij} \dot{q}_j {}^i r_i \quad (9)$$

i 번째 좌표계에서 본 원판의 위치 ${}^i r_i$ 는 i 좌표계의 x 방향의 단위벡터를 $e_x = [100]^T$ 로 정하면 $-x e_x$ 로 대체할 수 있고, 이것을 대입하여 (5)식을 링크의 길이에 따라 적분하면 링크에 걸리는 유체저항은 다음과 같이 관절변수의 함수로 정해진다.

$$d_i = \text{sign}({}^0v_i^n) \rho C_{D_i} r_i \int_0^{l_i} \left[\sum_{j=1}^i U_{ij} \dot{q}_j x e_x \right]^T {}^0A_i e_y dx_i \\ = \text{sign}(X) \frac{1}{3} l_i^3 \rho C_{D_i} r_i X^2 \quad (10)$$

$$X = \left[e_x^T \sum_{j=1}^i U_{ij} \dot{q}_j {}^0A_i e_y \right]^2$$

식 (10)을 이용하면 관절에 걸리는 토크는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_{di} = \tau_{di+1} \\ + \text{sign}({}^0v_i^n) \rho C_{D_i} r_i \int_0^{l_i} x \left[\sum_{j=1}^i U_{ij} \dot{q}_j x e_x \right]^T {}^0A_i e_y dx_i \\ = \tau_{di+1} + \text{sign}(X) \frac{1}{4} l_i^4 \rho C_{D_i} r_i X^2 \quad (11)$$

모든 관절에 대하여 식 (11)을 취합하여 표현하면 식 (2)의 $D(q, \dot{q})$ 항은 다음과 같이 얻어진다.

$$D(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} \tau_{d1} \\ \tau_{d2} \\ \vdots \\ \tau_{dn} \end{pmatrix} = |\dot{q}|^T \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} \dot{q} = |\dot{q}|^T T(q) \dot{q} \quad (12)$$

여기서, \dot{q} 은 각 관절의 속도 벡터이고, $T(q) \in R^{n \times n \times n}$ 는 로봇팔의 길이 및 반지름, 저항계수, 로봇의 자세 등과 관련된 3차원 행렬인 텐서이다.

3. 동적 조작도 해석

2장에서 모델링된 수중로봇의 동역학식을 이용하여 요시가와(Yoshigawa, 1985)가 제안한 조작도 타원과 조작지수에 의한 해석방법을 응용하여 수중로봇의 동적 조작도 해석을 수행한다. 자코비안을 이용하면 로봇팔의 기구학식은 식 (13)과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{r} = J(q) \dot{q} \quad (13)$$

\dot{r} 은 작업공간에서의 로봇팔 끝의 속도이고, $J(q)$ 는 자코비안 행렬이다. 식 (13)을 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 가속도

에 대한 식을 얻는다.

$$\ddot{r} = J(q) \ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q}) \dot{q} \quad (14)$$

식 (2)를 \ddot{q} 에 대하여 정리한 후 식 (14)에 대입하면,

$$\ddot{r} = J(q) \hat{M}^{-1} \ddot{r} \quad (15)$$

여기서,

$$\ddot{r} = \ddot{r} - \dot{J}(q), \\ \ddot{r} = \tau - C(q, \dot{q}) - D(q, \dot{q}) - G(q)$$

이다.

\ddot{r} 의 각 요소들이 ± 1 의 범위 내에 있도록 다음과 같이 무차원화 하면,

$$\tilde{\tau}_i = \frac{\ddot{r}_i}{\tau_{io}}, \quad \tilde{\tau}_{io} = \tau_{io} - |\hat{C}_i(q, \dot{q}) + D_i(q, \dot{q}) + \hat{G}_i(q)| \quad (16)$$

여기서, τ_{io} 는 i 번째 관절의 토크의 최대 한계이다.

식 (15)는 다음과 같이 된다.

$$\ddot{r} = J(q) \tilde{M}^{-1} \ddot{r} \quad (17)$$

여기서, $\tilde{M} = T_r(q) \hat{M}$, $T_r = \text{diag}[1/\tau_{io}(q)]$

그러면, $\tilde{\tau}^T \tilde{\tau} \leq 1$ 로 주어지는 관절 토크의 한계로부터 작업공간에서의 가속도의 한계는 다음과 같은 타원식으로 주어지고,

$$\ddot{r}^T (\tilde{M} J^+)^T \tilde{M} J^+ \ddot{r} \leq 1 \quad (18)$$

수중로봇의 조작도 지수는 다음식으로 정의된다.

$$w_d = \sqrt{\det[J(\tilde{M}^T \tilde{M})^{-1} J^T]} \quad (19)$$

식 (18)은 관절토크의 최대값에 부가질량, 전향력 및 원심력, 유체저항력, 그리고 중력 및 부력이 더해진 값으로 축소된 타원(scaled ellipsoid)의 식이며 식 (19)는 그 체적에 비례한 값이 된다. 이는 실제 로봇팔 끝이 도달할 수 있는 모든 가속도의 범위를 표시하기 보다는 순수한 관절의 힘으로 도달할 수 있는 가속도의 범위를 표시한다.

로봇팔 끝이 도달할 수 있는 모든 범위의 가속도를 얻기 위해서 식 (15)를 다음과 같이 표현한다.

$$\tilde{M} J^+ (\ddot{r} - \dot{J}(q) \dot{q}) + \hat{G}(q) + \hat{C}(q, \dot{q}) + D(q, \dot{q}) = \tau \quad (20)$$

관절 토크의 범위가 $\tau^T \tau \leq 1$ 로 주어지면 식 (20)으로부터 팔끝의 가속도의 범위는 다음과 같은 타원식으로 얻을 수 있다.

$$\{\ddot{r} - \dot{J} \dot{q} + J \hat{M}^{-1} (\hat{G} + \hat{C})\}^T \{J \hat{M}^{-1} (J \hat{M}^{-1})^T\}^{-1} \{\ddot{r} - \dot{J} \dot{q} + J \hat{M}^{-1} (\hat{G} + \hat{C})\} \leq 1 \quad (21)$$

식 (21)은 주어진 관절의 제약조건 아래에서 팔 끝이 얻을 수 있는 가속도의 범위를 속도나 중력 및 부력에 의한 성분까지 모두 표현한 것으로 중력 및 부력 그리고 속도에 의한 가속도 성분만큼 이동한 타원(shifted ellipsoid)의 식을 나타내고 있다. 따라서, 조작도 지수의 측면에서는 관성항만 고려한 것과 차이가 없다.

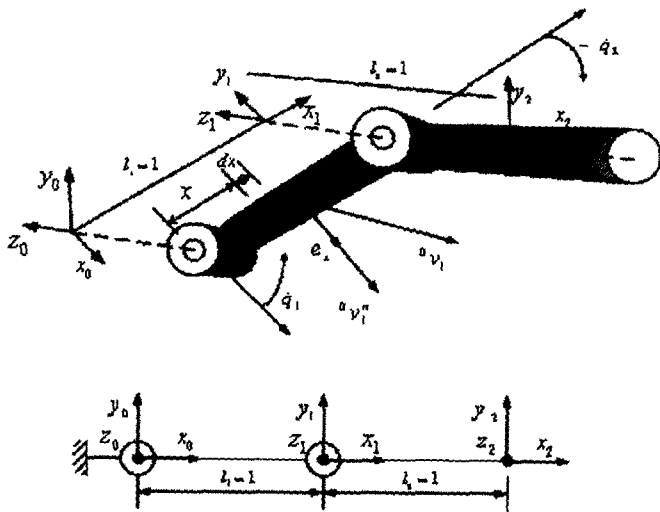


Fig. 2 Coordinate system and parameters of 2-link robot

4. 2절 로봇의 해석 예

본 장에서는 2장에서 유도된 수중로봇의 동역학 식과 3장에서 언급된 조작도 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 2와 같은 링크 구조와 좌표계를 갖는 2절 로봇팔의 조작도 해석 예제에 대하여 언급한다. 로봇팔의 링크는 단위길이를 가지는 반지름이 0.1m인 알루미늄 환봉으로 가정하였다. 알루미늄의 비중은 2.7로 물의 비중은 1000으로 하여 중량과 부력을 각각 계산하였다. 유체저항계수 C_D 는 0.2로 하였으며 부력중심과 무게중심은 일치한다고 가정하였다.

Fig. 3은 속도관련항과 중력 및 부력항을 고려하지 않고 관성항만을 고려하여 로봇팔 끝이 [0,0]에서 [2,0]까지를 움직일 경우에 대해 조작도 타원(ME)과 조작도 지수(MM)를 계산한 결과이다. 부가질량의 영향에 의해 수중의 경우가 공기중의 경우보다 MM이 작게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 공기중에서의 ME 내에 수중에서의 ME가 위치한다. 같은 관절토크의 제약조건에서 수중의 경우가 모든 방향으로 가속되기 더 어려움을 나타낸다.

Fig. 4와 5는 각각 같은 조건에서 중력 및 부력항은 고려하였으나 관절의 속도는 모두 0으로 하여 축소타원과 이동타원 방법으로 해석을 수행한 결과이다. Fig. 4에서 MM은 Fig. 3에서 보다 공기중 및 수중의 경우 모두에서 줄어들었으며 로봇팔 끝의 위치가 2에 가까워 질수록 MM은 줄어든다. 이는 같은 중량에 대해서 무게중심이 관절과 멀어질 수록 관절토크의 부담이 커지는데 기인한 결과이다. 공기중과 수중에서의 MM의 차이가 Fig. 3에 비해 적어지는 것은 중력의 영향이 부력의 영향에 의해 상쇄되었기 때문이다. 부력과 중력이 일치할 때 MM은 최대가 된다. Fig. 5는 이동타원에 의한 방법으로 MM은 Fig. 3과 일치하고 있다. 즉 타원의 부피는 Fig. 3과 같다는 것을 의미한다. 다만 타원의 중심이 중력의 영향에 의해 아래로 이동되어 있음을 확인할 수 있으며 수중의 경우는 부력에 의해 상쇄되는 영향으로 공기중에 비해 보다 이동량이 적음을 확인할 수 있다.

Fig. 6과 7은 중력 및 부력의 영향을 고려하고 1번과 2번 관절

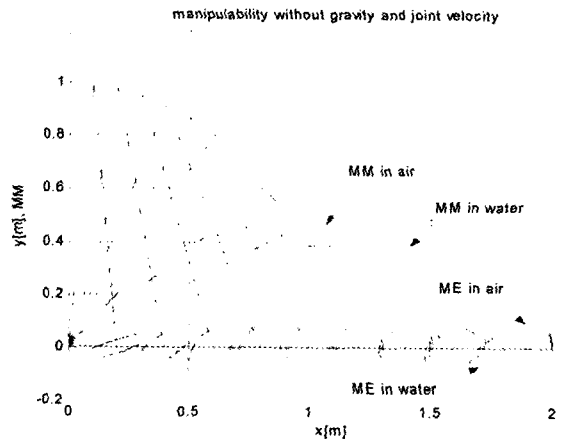


Fig. 3 MM and ME without gravity and joint velocity

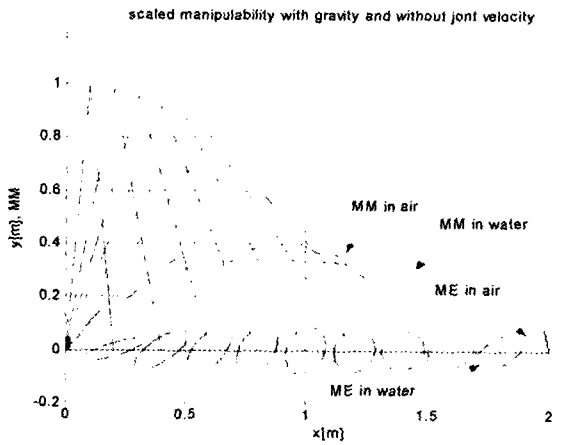


Fig. 4 Scaled MM and ME with gravity and without joint velocity

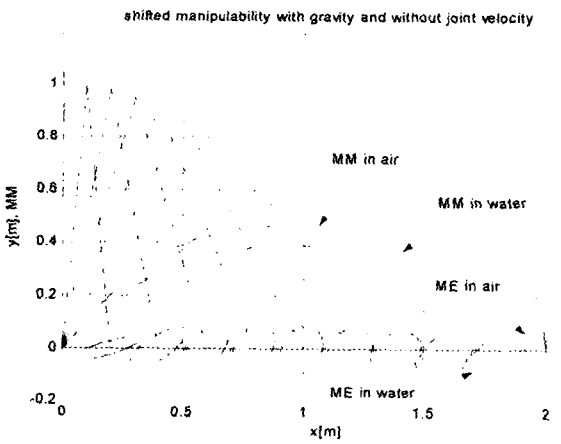


Fig. 5 Shifted MM and ME with gravity and without joint velocity

각속도가 각각 3, 2 rad/sec일 경우에 대하여 축소타원과 이동타원을 그린 것이다. 수중에서 관절의 속도가 과도하게 가정되었으나 이는 MM과 ME의 변화를 가시적으로 나타내기 위한 것이다. Fig. 6의 공기중 MM은 전향력 및 원심력에 의해 팔을 뻗

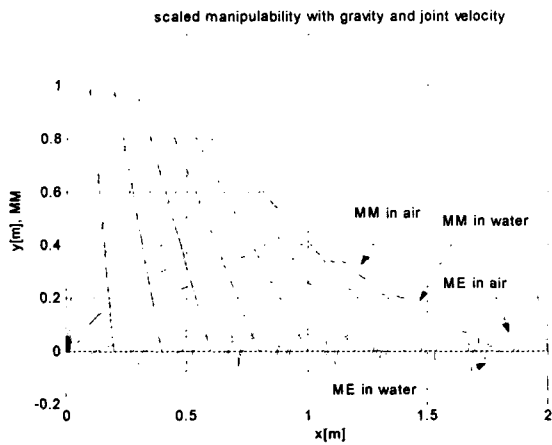


Fig. 6 Scaled MM with gravity and joint velocity of [3, 2]rad/sec

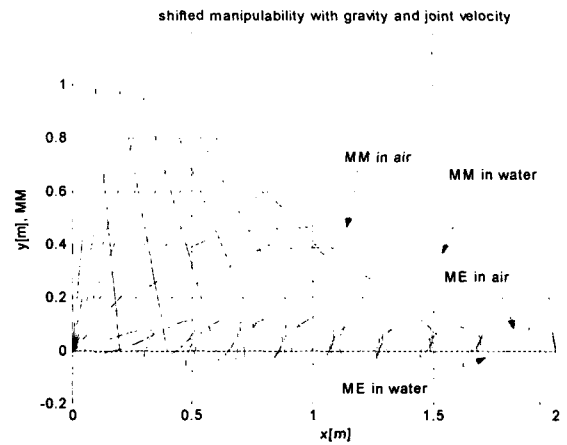


Fig. 9 Shifted MM with gravity and joint velocity of [-3, -2]rad/sec

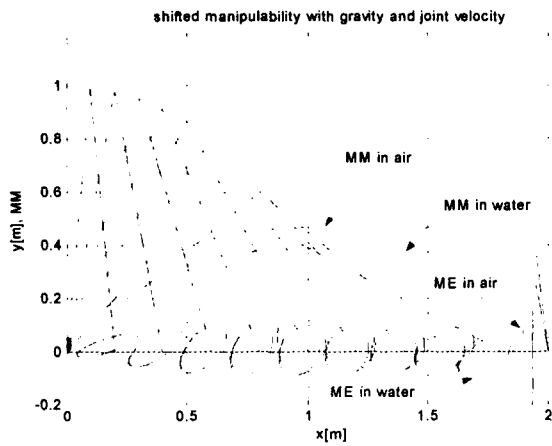


Fig. 7 Shifted MM with gravity and joint velocity of [3, 2]rad/sec

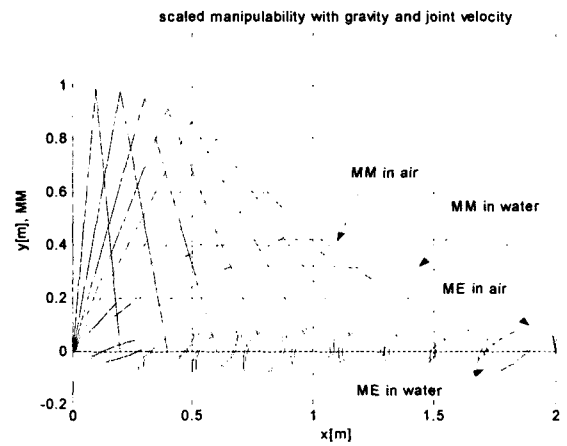


Fig. 10 Scaled MM with gravity and joint velocity of [3, -2]rad/sec

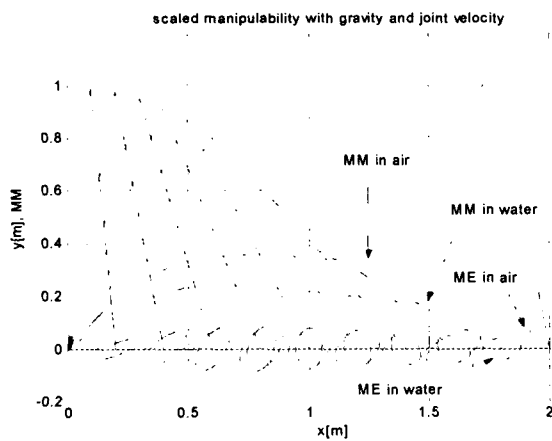


Fig. 8 Scaled MM with gravity and joint velocity of [-3, -2]rad/sec

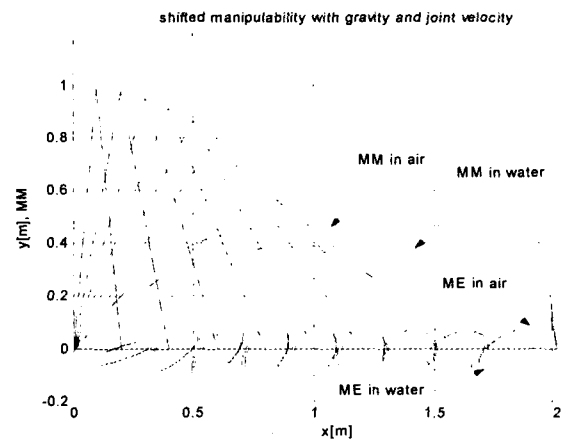


Fig. 11 Shifted MM with gravity and joint velocity of [3, -2]rad/sec

을 때 중력에 의한 MM의 감소량이 줄어들는 것을 확인할 수 있다. 수중의 경우에는 팔을 뻗을수록 유체저항의 영향에 의해 MM이 현저히 줄어든다. 이는 팔을 움츠릴 때 유체에 의한 저항이 현격히 줄어들 것이라는 직관과 잘 일치하고 있다. Fig. 7은

이동타원에 의한 해석으로 수중의 경우 유체저항에 의해 관절 속도와 반대되는 방향으로 타원이 많이 이동하였음을 확인할 수 있으며 그림에서 팔끝을 가속시키기 위해서는 팔을 움츠리는 것이 팔끝의 속도를 감소시키기 위해서는 팔을 펴는 것이 유리함

을 확인할 수 있다. MM은 변화가 없다.

Fig. 8과 9는 같은 조건에서 관절속도를 각각 -3, -2 rad/sec로 하였을 경우를 나타낸다. Fig. 8에서 공기중의 경우는 Fig. 6과 변화가 없으나 수중의 경우는 타원이 축소되는 방향이 Fig. 7과는 현저히 차이를 알 수 있다. 이는 로봇팔의 자세와 관절속도의 방향의 차이에 의한 것으로 MM과 ME를 이용하면 로봇팔의 속도의 방향에 따라 저항력을 최소화하는 자세를 얻어낼 수 있음을 나타낸다. 이러한 결과는 Fig. 9에서는 타원이 이동하는 방향으로 나타난다.

마지막으로 Fig. 10과 11은 관절의 속도가 각각 3, -2으로 방향이 반대되는 경우의 결과를 나타낸다. Fig. 10에서 공기중에서 타원의 축소되는 양이 Fig. 6이나 Fig. 8에 비해 현저히 줄어들고 있고 MM이 더 증가하는 것으로 보아 전향력 및 원심력이 중력에 의한 영향을 감소시키는 방향으로 작용하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11에서도 저항력에 의한 영향으로 타원의 이동량이 Fig. 7과 Fig. 9에 비해 적은 것을 알 수 있다. 이는 2번 링크의 유체와의 상대속도가 현격히 줄어들었으므로 1번 및 2번 관절에 미치는 저항토크가 줄어들었기 때문이다.

이상의 간단한 2절 로봇팔에 대한 동적 조작도 해석결과로부터 제안된 방법이 직관적으로 추정할 수 있는 사실과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으며, 제안된 방법을 이용하면 직관적으로 판단하기 어려운 보다 복잡한 링크구조를 갖는 로봇팔의 해석에 유용할 것으로 생각된다.

5. 결 론

여유자유도를 가지는 육상의 로봇의 설계나 해석 및 제어에 널리 응용되고 있는 조작도 해석방법으로부터 수중로봇에 적용 가능한 조작도 해석방법을 제안하였으며 간단한 2절 로봇에 대한 해석을 수행하였다. 수중에서 작용하는 다양한 유체외력을 고려하기 위하여 수중로봇의 모델링방법을 제안하였으며 특히, 로봇팔의 유체저항을 명확히 표현하는 해석적인 모델링 방법을 제안하였다. 모델링된 수중로봇의 동적 조작도 해석을 위해 조작도 타원에 근거한 축소타원과 이동타원의 두 가지 방법을 제안하였다. 로봇팔의 관절토크의 제한범위는 두 가지 방법에 의해 각각 로봇팔 끝의 가속도가 도달할 수 있는 타원으로 변환되며, 이들은 로봇의 순수 토크에 의해 얻어지는 가속도 공간과 속도와 중력 및 부력의 영향을 포함해서 얻어지는 총체적 가속도 공간으로 각각 변환된다. 제안된 방법은 2절 링크 예제를 통해 그 타당성과 효용성을 확인하였다. 제안된 수중로봇팔의 조작도 해석은 여유자유도를 가지는 로봇팔이 수중에서 속도를 가지고 움직일 때 로봇의 능력을 판단하는 해석도구로 활용될 수 있으며 향후 유체저항을 최소화하는 로봇팔의 설계나 제어에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 "차세대 심해용 무인잠수정 개발

(III)" 사업의 일환으로 수행된 연구결과임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- Tsuneo Yoshikawa (1985a). "Manipulability of robot mechanisms", The International Journal of Robotics Research, vol. 4, no. 2, pp. 3-9.
- Tsuneo Yoshikawa (1985b). "Dynamic manipulability of robot manipulators", Journal of Robotics Systems, vol. 2, no. 1, pp. 113-124.
- Chiacchio, P., Chiaverini, S., Sciacivco, L. and Siciliano B. (1992). "Influence of gravity on the manipulability ellipsoid for robot arms", Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, vol. 114, no. 4, pp. 723-727.
- Chiacchio, P., Chiaverini, S., Sciacivco, L., and Siciliano, B. (1991), "Global Task Space Manipulability Ellipsoids for Multiple-Arm Systems", IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol. 7, No 5, pp. 678-685.
- Chiacchio, P., Bouffard-Vercelli, Y., and Pierrot, F. (1997), "Force Polytope and Force Ellipsoid", J. Robot Syst., Vol. 14, No. 8, pp. 613-620.
- Rosenstein, M.T, Grupen, R.A. (2002). "Velocity-dependent dynamic manipulability", Proc. ICRA '02 IEEE, vol.3 pp. 2424-2429.
- J. Lee (2001) "Velocity workspace analysis for multiple arm robot systems," Robotica, vol. 19, pp.581-591.
- S.W Hong, P.M. Lee, Y.K. Lim, C.M. Lee, B.H. Jeon, J.W. Park, Y.C. Choi, S.M. Kim and S.J. Suh (2002). "Design and Implementation of a Dual Use Purpose Semi-Autonomous Underwater Vehicle", Proc. of Underwater Defence Technology 2002, Korea.
- K. S. Fu R. C. Gonzalez and C. S. G. Lee (1987). Robotics : Control, Sensing, Vision, and Intelligence, International edition, McGraw-Hill, Singapore
- Scott McMillan, David E. Orin and Robert B. McGhee (1995)., "Efficient Dynamic Simulation of an Underwater Vehicle with a Robotic Manipulator", IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 25. No. 8. pp.1194-1206.
- T. J. Tarn, G. A. Shoults and S. P. Yang (1996), "A Dynamic Model of an Underwater Vehicle with a Robotic Manipulator using Kane's Method", Autonomous Robots 3, pp.269-283.