

수중 외란을 고려한 다중 자율 잠수정의 무충돌 주행 계획기의 개발

정연수* · 지상훈* · 고우현* · 이범희*
*서울대학교

Multi-AUV Motion Planner with Collision-Map Considering Environmental Disturbances

YEUN-SOO JUNG*, SANG-JOON JI*, WOO-HYUN KO* AND BEOM-HEE LEE*

*Seoul National University, Seoul, Korea

KEY WORDS: Multi-AUV 다중 자율 잠수정, Collision-Map 충돌맵, Motion Planner 주행 계획기, Environmental Disturbances 환경외란

ABSTRACT: The operation planning of multi-AUV is considered as a very difficult task. This paper proposes the qualitative method about the operation plan of multi-agents. In order to achieve this goal, it applies an extension collision map method as a tool to avoid collision between multi AUVs. This tool has been developed for the purpose of collision forecasting and collision avoidance for the multi-agents system in a land where a control is much easier. This paper analyzes the avoidance value of maximum path of AUV in order to apply this to a water environment where a tidal, a wave and disturbances are common. And it suggests the method that the maximum path avoidance can be applied to the collision avoidance on the extension collision map. Finally, the result proves that multi AUVs effectively navigates to the goal point, avoiding the collision by the suggested method.

1. 서 론

근래에 한·일간의 외교 분쟁으로 까지 확대되는 독도 해역 수중탐사와 동해상에 추락된 F-15K 잔해 확인을 위한 작업과 더불어 해저 지도 제작, 파이프라인 설치에 대한 수요가 급증하고 있다. 이와 같은 수요와 위험성 증가에 따라 수중 로봇의 무인 자율화와 여러 대의 AUV 활용에 대한 요구도 점점 높아지고 있다. 무인 자율화를 위한 고성능 제어기 개발은 해양환경의 유체 및 동력학적인 비선형으로 인하여 비선형기법의 다양한 형태로 발전하였다. 여기에는 Yoerger and Slotine (1985) 슬라이딩 모드, Healey and Lienard (1993)의 다 변수 슬라이딩 모드 등이 있다.

그러나 비록 이런 뛰어난 제어기조차도 복잡한 해양 환경의 특성을 반영하기는 불가능 하였고, 이런 현실에서 한 대가 아닌 수 십대의 수중로봇(AUV)을 효율적으로 운행하기 위한 운영 개념을 연구하고, 적용하기는 힘든 측면이 있다. 현재 지상 mobile robot조차도 다 개체로봇(Multi-agents)에 대한 연구가 많이 진행되었지만, 다 개체의 동작 계획(Motion planning)은 NP-hard

문제로 해결할 수 없는 것으로 판명하였다.(Akella and Hitichison, 2003). 그렇지만 연구자들은 수학적 방법이 아닌 다른 방법으로 문제의 해결을 시도하였다. 주로 중앙통제방식으로 전체적인 계획을 위해서는 좋은 장점을 가졌다.(Arai and Ota, 1992) 비록 개체 수 증가에 따른 컴퓨터 계산 능력이 늘어난다는 점과 완전한 형태의 global map의 필요성 등의 단점은 있지만, off-line 상의 계획을 통한 실제적인 적용이 가능한 방법으로 여겨졌다. 여기에 대표되는 것이 두 대의 로봇에 대한 궤적 정보를 2차원 그림으로 보여주는 충돌 지도방법이 있다.(Lee, 1987) 충돌지도(Collision map)는 여러 대의 로봇에 대한 충돌지도를 작성하여 그에 따른 동작 정보를 입력하여, 사전에 주행 계획기를 만드는 것이다. 이런 가운데 본 연구는 해양 환경의 외란과 AUV의 동적 특성을 고려한 실제적인 운항정보를 가지고, 다 개체 로봇의 동작 계획에 적용되는 충돌 지도에 기반을 둔 주행 계획기를 제안하고자 한다. 따라서 선정된 AUV와 해류 모델의 경로 이탈치(Cross track error, 이하CTE)를 계산한 결과를 충돌 지도에 적용했을 때의 변화를 보고자 한다. 연구는 크게 AUV 및 외란 modeling, CTE 계산, 주행 계획기에 영향을 주는 경로오차에 의한 충돌지도의 변화 등으로 이루어졌다.

교신저자 정연수: 서울시 관악구 신림9동 산56-1번지
02-810-4923 jung0818@snu.ac.kr

2. AUV 운동 모델과 해류 모델

2.1 AUV 운동 모델

수중에서 AUV 위치는 지표고정 좌표계(Earth-fixed coordinate)나 선체고정 좌표계(Body-fixed coordinate)로 표현된다. 지표고정 좌표계 상에서 AUV의 위치와 방향은 $\eta_1 = [x, y, z]$, $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]$ 로 표현되고, 선체고정 좌표계 상에서 각 축방향의 속도와 각속도는 $v_1 = [u, v, w]$, $v_2 = [p, q, r]$ 로 표현된다. Fig. 1은 지표고정 좌표계와, 선체고정 좌표계 사이의 관계를 보여 주고 있다. 두 축사이의 변환은 자코비안 행렬을 이용해서 이루어진다. 동역학 분석은 선체고정 좌표계 상에서 CTE 계산은 지표고정 좌표계를 사용하여 위치 및 방향의 변화량을 계산하였다. 다음은 두개의 상관관계를 보여 주고 있다

$$\begin{aligned}\eta_1 &= J_1(\eta_2)v_1 \\ \eta_2 &= J_2(\eta_2)v_2\end{aligned}\quad (1)$$

AUV는 항해시 유체에 의해 부가적으로 힘을 받게 된다. 유체의 점성과 밀도에 의한 부가질량과 강체의 외형에 따른 부력, 해류나 파도에 의한 외력 등으로 인해 AUV 동역학 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + \tau_E \quad (2)$$

AUV의 운동 방정식은 식 (1)과 식 (2)로부터 얻은 6자유도 비선형 방정식에서, 이번 연구에서 다룰 수평면 상에서의 경로 오차 모델링을 위해 스웨이(Sway)방향과 요(Yaw)방향에 대한 운동 방정식만을 고려하기로 한다.

$$\begin{aligned}Sway : m[\dot{v}_r + u_r r - w_r p + x_G(pq + r^2) - \\ y_G(p^2 + r^2) + z_G(qr - \dot{p})] - (W - B)\cos\theta\sin\phi = Y_f\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}Yaw : I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - I_{xy}(p^2 - q^2) - I_{yz}(pr + \dot{q}) \\ + I_{xz}(qr - \dot{p}) + m[x_G(\dot{v}_r + u_r q - w_r p) \\ - y_G(\dot{u}_r - v_r r + w_r q)] - (x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi \\ + (y_G W - y_B B)\sin\theta = N_f\end{aligned}\quad (4)$$

여기서, x_G , y_G , z_G 는 지표면 고정 좌표계에서 AUV의 무게 중심의 위치이고, m , W , B 는 각각 AUV의 질량, 무게, 부력이다. I 는 관성 모멘트이고, Y_f , N_f 는 각 방향으로의 외력의 합이다. 일

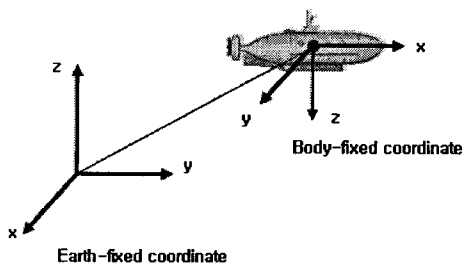


Fig. 1 Relation between coordinate systems of AUV

반적인 심도 유지 항해 시에 AUV는 중성부력을 가지며, 관성모멘트는 대칭이므로, 전진속도가 일정하다는 가정 하에서 AUV의 수평면 운동 방정식은 다음과 같이 선형화 되어 표현된다.

$$u_r = U_0 \quad (5)$$

$$m\dot{v}_r = -mU_0 r + \Delta Y_f(t) \quad (6)$$

$$I_{zz}\dot{r} = \Delta N_f(t) \quad (7)$$

$$\dot{x} = U_0 \cos\psi - v_r \sin\psi \quad (8)$$

$$\dot{y} = U_0 \sin\psi - v_r \cos\psi \quad (9)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (10)$$

2.2 해류 모델

AUV가 항해시 유체의 움직임에 따라 외란을 받기 때문에, 수중 외란 모델은 AUV의 운동을 분석하는 데 중요한 요소이다. 본 연구에서는 연안에서 AUV 운용의 경우로 연안에서 발생하는 해류 중 주된 영향을 미치는 조류(조석차), 취송류(바람)를 고려했고, 해류의 크기는 1차 Gauss-Markov Process를 이용하여 모델링 하였다.

$$\dot{V}_c(t) + \mu_0 V_c(t) = w(t) \quad (11)$$

$w(t)$ 는 평균이 0인 백색잡음이고, μ_0 는 음수가 아닌 상수이다. 해류에 의해 AUV에 가해지는 힘과 모멘트는 AUV의 운동 방정식에 상대속도로 표현된다.

$$v_r = v - v_c \quad (12)$$

이때 V_c 는 해류의 속도로, AUV의 방향에 따라 다음과 같이 선체고정 좌표계에서 표현 될 수 있다. 이때 β_c 는 해류의 방향이다.

$$u_c = V_c \cos(\beta_c - \psi) \quad (13)$$

$$v_c = V_c \sin(\beta_c - \psi) \quad (14)$$

3. 해류에 의한 경로 오차 분석

선형화된 식을 이용하여 AUV의 운동 방정식을 상태방정식으로 표현하면 식 (15)와 같다. 상태변수는 y 축 속도(v_r), z 축 각속도(r), z 축 각도(ψ)이고, 입력($\delta_r(t)$)은 AUV의 수평방향타의 각도이다.

$$\begin{bmatrix} m - Y_{v_r} & 0 & 0 \\ 0 & I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_r \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{v_r} & Y_r - mU_0 & 0 \\ N_{v_r} & N_r & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r(t) \quad (15)$$

선체고정 좌표계로 변환된 해류를 식 (15)에 적용시켜 해류를 고려한 AUV 동역학 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_r \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_\delta - a_{11} \\ N_\delta - a_{21} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_r \\ D \end{bmatrix} \quad (16)$$

이때 D는 해류모델로 다음과 같이 표현 된다.

$$D = V_c \sin(\beta_c - \psi) \quad (17)$$

AUV의 제어를 위해서 PD 제어기와 LOS 제어기를 사용하였다. 다음은 제어기를 통해 AUV에 입력되는 제어 입력식이다.

$$\delta(s) = (K_p + K_D)(2\psi_d - \psi(s) + C_1 CTE(s)) \quad (18)$$

K_p 와 K_D 는 PD 제어기의 P 계인과 D 계인이며, ψ_d 는 목표 방향이고 $\psi(s)$ 는 AUV의 현재 방향이다. C_1 는 LOS 제어기의 상수이고, $CTE(s)$ 는 목표 경로에서 떨어진 거리 값이다. 선형화된 AUV의 운동방정식에서 Y 축 속도에 대한 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} V(s) = & (-G_1 - G_2) V_c \cos(\Delta\psi_e) \\ & + (G_3 + G_4)(K_D C_1 CTE(s) s^2 \\ & + K_p C_1 CTE(s) s + K_p(2\psi_d - \psi_e)) \end{aligned} \quad (19)$$

이때, $\Delta\psi_e = \beta_c - \psi_e$ 로 해류방향과 AUV의 방향의 평행점 사이의 차이 값이다. G_1, G_2 는 해류에 의한 속도 변화 전달함수이고, G_3, G_4 는 제어입력에 의한 속도 변화 전달 함수이다. V_c 는 해류의 속도이며, 따라서 CTE에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} CTE(s) = & \frac{U_0 \sin(\psi_e - \psi_d)}{s(1 - s(G_3 + G_4)C_1 \cos(\psi_e + \psi_d)(K_p + sK_D))} \\ & - \frac{s(G_1 + G_2)V_c \cos(\Delta\psi_e) \cos(\psi_e + \psi_d)}{s(1 - s(G_3 + G_4)C_1 \cos(\psi_e + \psi_d)(K_p + sK_D))} \\ & + \frac{s(G_3 + G_4) \cos(\psi_e + \psi_d) K_p(2\psi_d - \psi_e)}{s(1 - s(G_3 + G_4)C_1 \cos(\psi_e + \psi_d)(K_p + sK_D))} \end{aligned} \quad (20)$$

경로오차에 대한 해를 구하기 위해서 계산의 복잡성으로 인해 수치해석을 사용하였다. MatLab을 사용하여 AUV의 수중 운동방정식에 해류를 적용시켜 모델을 만들어 경로오차를 확인하였다.

4. 충돌 지도를 이용한 주행 계획기 작성

4.1 충돌 예측

충돌 지도는 작업 영역을 공유하는 두 개체들의 무 충돌 주행 계획 방법으로 주요 개념은 다음과 같다. 높은 우선순위 개체를 agent 1, 낮은 우선순위를 가진 개체를 agent 2라고 하고, 두 개체의 반경을 각각 r_1 과 r_2 라고 하자. agent 2에 대한 장애물 공간에서 agent 1은 r_1+r_2 의 반경을 가진 장애물로, agent 2는 중심점에 놓여진 점 개체로 표현된다. 충돌 지도 기법에서는 agent 1의 행동 궤적은 변경되지 않고, 두 개체의 충돌이

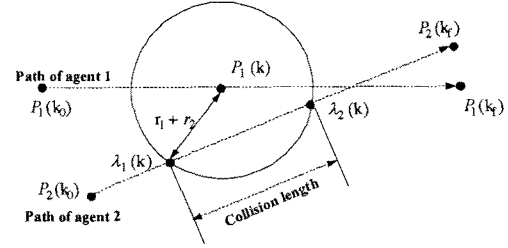


Fig. 2 The paths of agents and the collision length

예상될 경우에만 agent 2의 행동 궤적을 변경한다. Fig. 2에서 $p_1(k)$ 은 샘플링 시간 k 에서의 agent 1의 중심의 위치이다. 샘플링 시간 k 에서의 agent 2의 위치 $p_2(k)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$p_2(k) = p_2(k_0) + \lambda(p_2(k_f) - p_2(k_0)) \quad (21)$$

Fig. 2의 $\lambda_1(k)$ 과 $\lambda_2(k)$ 사이의 영역과 같이 agent 1의 경로와 겹치는 agent 2의 경로 부분을 충돌길이(Collision length)라고 명명한다. 샘플링 시간 k 에서 두 점 $p_1(k)$ 과 $p_2(k)$ 사이의 거리가 agent 1의 반경 (r_1+r_2)보다 크면 두 개체는 충돌하지 않는다. 이 무 충돌 조건을 수식으로 나타낸다면 다음과 같다.

$$(r_1 + r_2)^2 \leq \|p_1(k) - p_2(k)\|^2 \quad (22)$$

식 (21)을 이용하여 식 (22)을 정리하면 식 (23)과 같은 λ 의 2차 부등식이 된다.

$$\begin{aligned} \lambda^2 \|p_2(k_f) - p_2(k_0)\|^2 - 2\lambda (p_1(k) - p_2(k_0))^T \\ \cdot (p_2(k_f) - p_2(k_0)) + \|p_1(k) - p_2(k_0)\|^2 \\ - (r_1 + r_2)^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

Agent 1의 동작 계획은 변경되지 않는다고 가정하였기에, 모든 샘플링 시간 k 에서의 $p_1(k)$ 은 미리 결정된다. 식(23)의 판별식이 0이거나 양인 경우에는 개체 간 충돌이 발생할 가능성이 있다. 따라서 경로 상 충돌 가능성이 있는 두 개체의 무 충돌 조건은 식(23)의 좌변 항이 음수가 되는 λ 의 영역이 0과 1 사이 영역과 교집합이 없어야 한다는 것으로 표현된다.

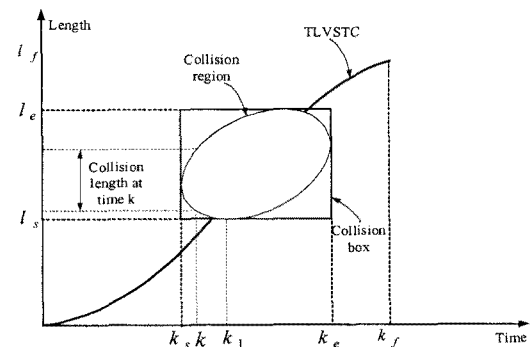


Fig. 3 Traveled length versus servo time curve(TLVSTC) and the collision region

두 개체 사이의 충돌은 Fig. 3을 이용하여 추상화시킬 수 있다. Fig. 3에서 수직 축은 agent 2의 정규화된 이동 거리(Normalized traveled length)를 나타내고, 수평축은 개체의 제어 시간이다. 매 샘플링 시간 k 마다 검사된 중첩 경로들은 충돌영역(Collision region)을 형성한다. Agent2의 TLVSTC(Traveled length versus servo time curve)가 충돌영역을 지나간다면 두 개체가 현재 동작 계획대로 이동할 경우 충돌할 것이다.

4.2 충돌 회피

충돌지도에 의한 충돌회피는 경로 변경이 아니라 이미 정해진 경로를 속도를 조절하여 충돌을 회피할 수 있는가에 관한 해법이다. 충돌상자(Collision box)는 Fig. 4에서 보듯이 좌하단 좌표가 (k_s, l_s) 이고 우상단 좌표가 (k_e, l_e) 인 직사각형이다. 충돌상자(Collision box)의 모서리 좌표를 알 수 있으므로 로봇의 궤적곡선이 모서리 점을 통과하도록 조절할 수 있다. 이런 충돌상자의 개념을 이용하면 Fig. 4에서와 같이 하위 우선순위 로봇의 출발을 지연시켜 충돌을 회피하는 방법을 제안할 수 있다.

4.3 AUV 경로 오차에 의한 충돌상자(collision box) 변화

Off-line 상에서 다수의 AUV를 충돌 없이 운용하기 위한 기법으로 제시된 충돌상자의 경계선은 수학적으로 표현하기가 어렵고, 수식적으로 결정하기가 곤란하다. 이런 가운데 해당 AUV들의 동특성 및 외란에 의한 경로 이탈치에 의한 궤적의 변화를 만드는 기준이 되는 충돌상자의 변화는 어느 정도 예측이 가능하다. Fig. 5에서 보듯이 두 대의 AUV가 실제적인 항해에서 경로오차에 의해 변경된 충돌지역을 갖게 된다. 변경된 충돌지역은 Fig. 6과 같이 전체적인 충돌상자의 변화를 가져오는 결과가 된다. 따라서 Off-line상에서 AUV특성과 해역의 상황을 파악하면 충돌상자의 변화된 크기를 예상할 수 있고 이를 통하여 보다 정확한 주행 계획기(Motion Planner)가 가능하다. 이런 주행 계획기를 통하여 보다 안정적인 AUV운용을 가능케 한다.

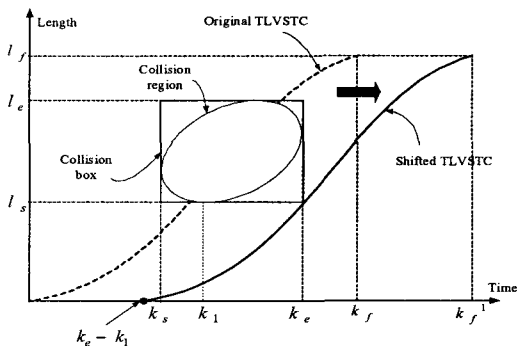


Fig. 4 An example of collision avoidance in case of time delay

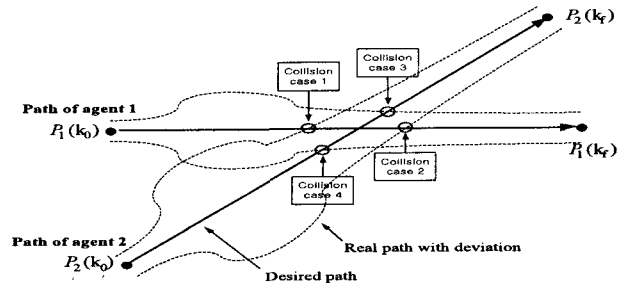


Fig. 5 Collision cases via each AUV's path deviation

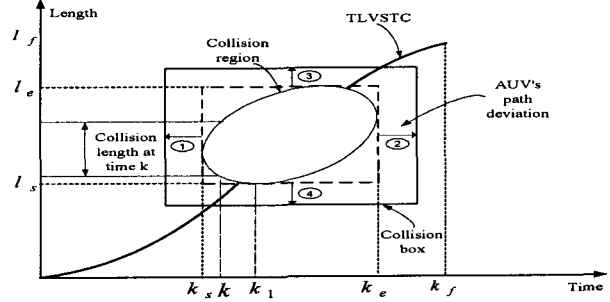


Fig. 6 The collision box changed by AUV's path deviation

5. 결 론

지금까지 본 연구에서는 환경외란에 의해 경로 오차가 발생하는 두 대의 AUV를 안정적으로 운행시키는 충돌지도에 기반한 주행 계획기를 제안하였다. Off-line 상에서 보다 정확하게 충돌회피를 위해 AUV와 해류에 대한 모델링을 통하여 충돌상자(Collision box)를 구현하고 이에 따른 궤적 변경이 가능도록 한 것이다. 차후에는 여러 대의 AUV에 대하여 우선순위 분배방식에 대한 연구와 운행 중에 계획하지 못했던 이동장애물에 대한 회피 방법에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

이계홍, 이관목, 이상정 (2001). "신경회로망 기반의 적응제어기를 이용한 AUV의 운동제어", 한국 해양 공학회, 추계학술대회 논문집 P.91-96

고낙용, 서동진 (2003). "다중 이동 로봇의 중앙감시에 의한 충돌회피 동작 조정 방법", 전기공학회지, vol.32D, no.4.4, pp 223-232

Lee, B.H. and Lee, C.S.G. (1987). "Collision-free motion planning of two robots", IEEE Transaction on Systems, Main and Cybernetics, vol.SMC-17, no.1,

Park, Seung Hwan and Lee, Beom Hee (2006). "Analysis of robot collision characteristics using the concept of the collision map", Robotica, vol.24, pp 295-303

Fossen, T.I. (1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons, New York.