

CAPM을 이용한 AUV의 장애물 회피

Obstacle Avoidance for AUV using CAPM

양 승 윤*
Seung-Yun Yang

ABSTRACT

In this paper, we designed the hybrid path generation method which is named CAPM(Continuous path generation method based on artificial Potential field) that is able to be used in the obstacles environment. This CAPM was designed so that it puts together two obstacle avoidance algorithm—the continuous path generation method(CPGM) and the artificial potential field method(APFM). Here, the CAPM generate the safety path using continuous path curvature. But, this method has demerits when used in obstacles environment in which are closely located. Another method which is named the APFM generates the path with the artificial potential field in the obstacles environment. But, It has local minima in certain places and unnecessarily calculates the path in which obstacles are not located. So, the CAPM was designed for autonomous underwater vehicle(AUV) obstacle avoidance. As the result of simulation, it was confirmed that the CAPM can be applied to a safe path generation for AUV.

주요기술용어 : Path Tracking(경로추적), Path Generation(경로생성), Obstacle Avoidance(장애물회피)

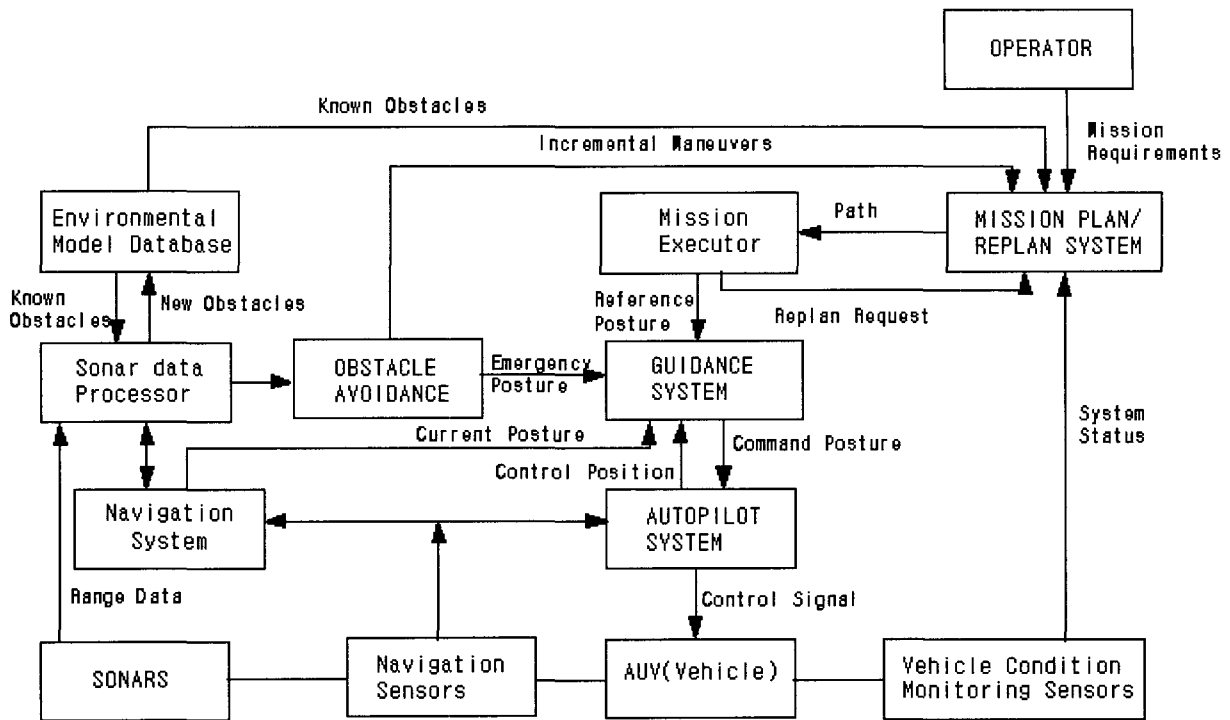
1. 서 론

무인 운동체에 관한 연구는 1960년대 초부터 시작 되었으나 기술적인 제한으로 이 분야에 대한 흥미는 60년대 후반부터 점차 줄어들었다. 그러나 최근에 무인 운동체의 개발에 필요한 고속 연산처리, 정밀항법장치, 고효율 구동기 등의 기술들이 상당히 발전이 이루어짐에 따라 인명위험을 줄이고, 인간의 조작이

불가능한 환경에서도 다양한 임무수행이 가능하며, 또한 효과도 증대 등을 목적으로 군사적인 적용에 활발한 연구 개발이 수행되고 있다⁽¹⁾.

이러한 무인 운동체의 연구에서 가장 중요한 목표는 운동체가 임무 실행동안 인간의 간섭없이 자율적으로 수행할 수 있도록 자율제어 시스템을 갖도록 하는 것이다. 특히 무인 수중운동체는 정찰, 조사, 기만 등의 많은 임무를 자율적으로 수행해야 되기 때문에 자율제어에서 경로생성/추적, 유도/조종, 항법, 장애물 회피 등의 기능은 무인 수중운동체 자율제어의 심장

* 국방과학연구소 제2체계개발본부



[그림 1] AUV signal flow diagram

부라 할 수 있다. 무인 수중운동체의 자율제어 시스템 흐름도는 그림 1과 같다. 무인 수중운동체의 자율제어 구성요소 중 장애물이 있는 환경에서 또는 사전에 예상치 못한 환경이나 상황에서도 최소시간에 안전하게 목적지까지 도달할 수 있게 하는 최적 경로 생성기가 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 장애물의 유무를 판단하여 수중운동체가 이를 회피하여 목표지에 도착하도록 하는 경로생성기에 대하여 고찰해 보고자 한다.

최근에 운동체의 무인화 개발 연구가 활발히 진행됨에 따라 장애물 회피를 위한 최적 경로생성 알고리즘의 연구도 많이 수행되고 있다. Lozano-Perez⁽²⁾는 물체의 형상인자(configuration parameter)를 좌표축으로 하는 형상 공간에 장애물에 대한 기하학적 제한을 표현하는 방법을 제안하였고, Kant⁽³⁾는 가시-그래

프 검색 알고리즘(visibility-graph search algorithm)을 이용하였으며, Gilbert⁽⁴⁾ 잠재적인 충돌 가능성을 지닌 물체 사이의 충돌 회피를 거리 함수(distance function)를 사용하여 표시하였다. 그리고, Shih⁽⁵⁾은 형상 공간을 확장한 형상 공간-시간 지도를 구성하여 여러 대의 로봇이 주어진 우선 순위에 따라 시작점에서 목적점까지 일정한 속도로 동작하는 알고리즘을 제안하였다.⁽⁶⁾ 만약 설계된 경로생성기에 의하여 생성된 경로의 곡률변화가 크면 무인 수중운동체는 잘 대응하지 못한다. 수중운동체는 추력이 작고, 몸체에 비하여 제어판이 작기 때문에 비행체와 달리 조종성능이나 추종성능이 약하다. 따라서 경로곡률을 바탕으로 경로를 생성하는 CPGM⁽⁷⁾은 무인 수중운동체의 운동 능력에 적합한 경로생성을 하는데 유리한 특징을 가지고 있다. 하지만 각 시간에 따른 각 점에서의 위치

를 계산해야 하는 번거로움으로 인해 계산량이 많아 지므로 예기치 않은 장애물에 대한 실시간 회피에 약간의 문제점을 가지고 있다. 이를 위하여 거리함수를 이용하여 인공전위계를 설정하는 APFM⁽⁸⁾으로 보정을 하였다. 물론 APFM은 다른 장애물 회피 경로생성 방식들에 비하여 계산량이 작다는 특징이 있지만, 장애물이 존재하지 않는 공간에서도 인공전위계의 불필요한 계산과정이 수행된다는 점과 목표점에 도달하지 못하고 국부 최소치에 빠지는 문제가 발생할 수 있는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 CPGM을 이용하여 전역경로를 생성하고, APFM을 적용하여 국부경로를 생성하게 하는 CAPM을 구성하여 안전하게 장애물을 회피하게 하는 무인 수중운동체의 경로 생성기를 설계하여 가능성을 검토하였다.

2. 수중운동체의 운동방정식 유도

본 연구의 목적인 장애물 환경에서 최적경로 생성기에 의하여 생성된 경로를 추적하는 경로추적기를 설계하기 위하여 수중운동체의 6자유도 비선형 운동방정식에서 동체좌표계의 원점을 중력 중심에 설정하고, 동체좌표축을 운동체의 관성주축으로, 또한 수중운동체가 연직면에 대하여 기하학적 대칭이고, 횡동요가 작다고 가정하여 다음과 같은 미분 방정식 형태의 수평면 운동방정식을 구할 수 있다⁽⁹⁾.

스웨이(Sway) 방정식 :

$$\begin{aligned} m\dot{v} + m_{ur} = & \frac{1}{2} \rho l^4 Y_v \dot{v} \\ & + \frac{1}{2} \rho l^3 (Y_v \dot{v} + Y_r ur) \\ & + \frac{1}{2} \rho l^2 (Y_v uv + u^2 Y_{\delta} \delta r) \end{aligned} \quad (1)$$

요(Yaw) 방정식 :

$$\begin{aligned} I_z \dot{r} = & \frac{1}{2} \rho l^5 N_r \dot{r} \\ & + \frac{1}{2} \rho l^4 (N_r ur + N_v \dot{v}) \\ & + \frac{1}{2} \rho l^3 (N_v uv + u^2 N_{\delta} \delta r) \end{aligned} \quad (2)$$

시스템 해석과 제어기 설계를 용이하게 하기 위하여 식 (1)과 (2)를 상태방정식으로 표현하기 위하여 상태변수를 식 (3)과 같이 정의한다.

$$X_h = [v, r, \psi]^T \quad (3)$$

여기서 v 는 스웨이 선속도, r 는 요 각속도 그리고 ψ 는 요각을 나타낸다. 정의된 상태변수에 의하여 수평면에서의 운동방정식을 미분방정식 형태에서 상태공간 방정식으로 표현하면 식 (4)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \\ 0 \end{bmatrix} [\delta r] \quad (4)$$

여기서, M_{ij} 와 A_{ij} 는 유체계수이고, δr 은 방향타이다.

3. 경로추적기 설계

수중운동체가 목적경로를 이탈하게 되면 장애물과의 충돌이 야기되며 또한 부가적인 항해가 소요되므로 내장용 전원의 불필요한 소모로 인한 수중 항해거리에 제약을 받게 된다. 따라서 본 논문에서 경로추적

기 설계를 위하여 Gao⁽¹⁰⁾가 제안한 도달모드 동특성을 이용한 확대계 등가제어 방법을 응용하여 절환함수의 운동방정식을 직접 구성하여 확대계 등가제어를 설계하므로써 도달조건을 확립할 뿐만 아니라 도달위상 중의 시스템 동특성도 지정한다. 먼저 절환함수의 운동방정식을 다음의 미분방정식 형태로 구성한다.

$$\dot{\sigma} = -Q \operatorname{sgn}(\sigma) - Rf(\sigma) \quad (5)$$

여기서 이득 Q, R 는 대각행렬에서 양의 요소로 이루어지며, sgn 은 부호함수를 나타낸다. 또한 스칼라 함수 f_i 는 다음 조건을 만족한다.

$$\sigma_i f_i(\sigma_i) > 0 \quad (\sigma_i \neq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

식 (5)을 도달 방정식이라 부르고 Q, R 를 임의로 지정함으로써 도달 모드에서의 σ 의 구조상태를 지정할 수 있다. 시스템 방정식과 절환함수를 식 (7)로 구성하고 확대계의 등가 제어입력을 설계한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \sigma &= Sx \end{aligned} \quad (7)$$

먼저 식 (7)에서 σ 를 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{\sigma} = S(Ax + Bu) \quad (8)$$

식 (5)와 (8)을 이용해서 제어입력을 유도하면

$$u = -(SB)^{-1}SAx - (SB)^{-1}\{Q \operatorname{sgn}(\sigma) + Rf(\sigma)\} \quad (9)$$

이 된다. 설계된 경로추적기 성능분석을 위하여 적용한 모델은 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & -0.4372 & -0.66 & 0.0 \\ 0.0 & -0.3376 & -0.7292 & 0.0 \\ 2.056 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ v \\ r \\ y \end{bmatrix} \quad (10)$$

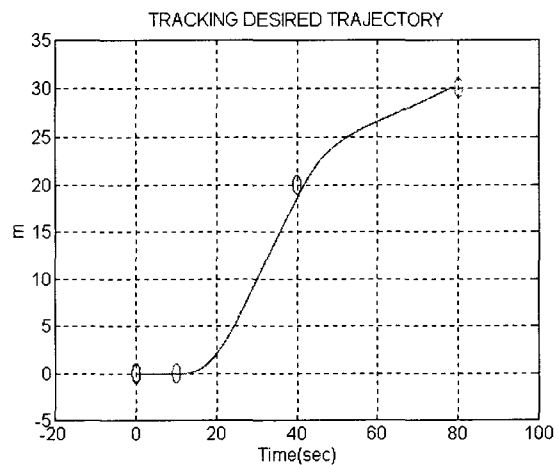
$$+ \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.1185 \\ -0.1358 \\ 0.0 \end{bmatrix} [\delta r]$$

설계된 슬라이딩 평면은 식 (11)과 같다.

$$\sigma = 0.1979(\phi - \phi_c) + 0.2346v + 0.9517r + 0.0087y \quad (11)$$

그리고 슬라이딩 평면이 설계되고 나면 식 (6)을 이용하여 제어입력을 설계하면 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \delta r = & 0.1766(\phi - \phi_c) - 4.0914v - 6.4162r \\ & + 0.0001 \operatorname{sgn}(\sigma) + 20.0\sigma \end{aligned} \quad (12)$$



[그림 2] Path tracking results of path tracker

이상과 같이 설계된 경로추적기의 성능을 분석하기 위하여 설계된 슬라이딩 평면과 제어입력을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 경유점은 (0, 0)에서 출발하여 (10, 0), (40,20), (80,30)을 추적하도록 명령하였다. 그림 2는 식 (11)과 (12)로 설계된 슬라이딩 모드와 제어입력으로 경로추적 성능을 시뮬레이션한 결과이다. 모든 경유점을 양호하게 잘 찾아 추종함을 알 수 있다.

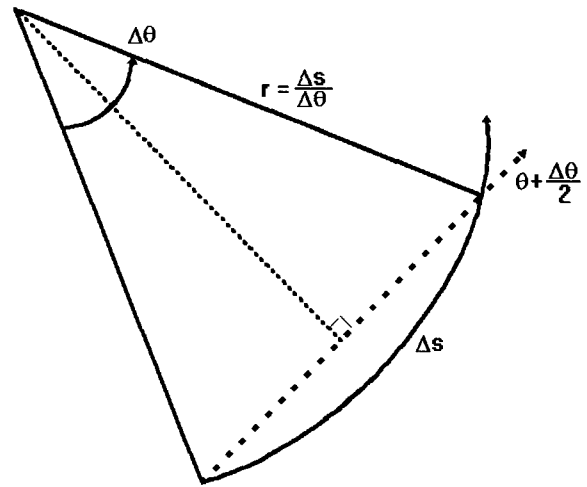
4. 최적 경로생성기 설계

4.1 CPGM을 이용한 전역경로 생성⁽⁷⁾

CPGM은 장애물이 위치해 있는 공간에서 수중운 동체가 장애물을 피하는 동안 이미 지정된 경로점을 따라가는 경로를 만드는데 관심이 있다. 이러한 원하는 경로를 만드는 과정은 다음과 같은 세 단계로 구성된다.

- (1) 경로 추정 알고리즘에 따라 경로점을 생성시킨다.
- (2) 만일 장애물이 감지된다면 수중운동체의 작동성을 넘어서지 않는 영역내에서 장애물 회피에 충분할 정도의 변화된 경로곡률을 생성시킨다.
- (3) 지정된 경로에 새롭게 생성된 경로점을 포함시킨다.

이 세 단계를 반복 수행하여 원하는 경로를 생성시키는 것이 CPGM이다. 수중운동체 경로 변화를 일정 시간 간격 Δt 에 대해 측정 가능하고, 경로에 따른 각 경로점에서의 경로 값의 변화를 Δs 라하고, 그 각 경로점에서 원점 변화를 각 시간 간격에 대해 $\Delta \theta$ 라 하면 이 변수들 사이에는 식 (13), (14)와 같은 관계가 성립한다.



[그림 3] Path Geometry

$$U = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \rightarrow \Delta s = U \Delta t \quad (13)$$

$$\theta = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \rightarrow \Delta \theta = \theta \Delta t \quad (14)$$

여기서 U는 수중운동체의 경로 이동속도이고, θ 는 수중운동체의 초기 각속도이다.

이 값들을 바탕으로 경로점을 구성하는 경로배열인 s를 x, y, θ 의 함수로 가정할 수 있고, 증가치인 Δs 와 $\Delta \theta$ 는 다음 시간에서 경로점을 계산하기 위해 주어진다. 이와 같은 관계를 이용하여 생성될 경로의 다음 방향은 식 (15)에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x(s + \Delta s) &= x(s) + \Delta s \cdot \cos \theta \left(\theta(s) + \frac{\Delta \theta}{2} \right) \\ y(s + \Delta s) &= y(s) + \Delta s \cdot \sin \theta \left(\theta(s) + \frac{\Delta \theta}{2} \right) \\ \theta(s + \Delta s) &= \theta(s) + \Delta \theta \end{aligned} \quad (15)$$

따라서, 다음의 경로점은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q(s + \Delta s) = f[x(s + \Delta s), y(s + \Delta s), \theta(s + \Delta s)] \quad (16)$$

평균곡률을 가진 원호로 이 곡선을 추정하므로 곡률반경은 다음과 같이 된다.

$$r = \frac{\Delta s}{\Delta \theta} = \frac{U}{\theta} \quad \text{if } \Delta \theta \neq 0 \quad (17)$$

또한 시간 간격 Δt 의 직선 원호의 길이를 계산할 수 있다면 식 (18)의 관계를 구성할 수 있다.

$$\frac{d/2}{r} = \sin \frac{\Delta \theta}{2} \quad (18)$$

이상의 변수들의 관계를 바탕으로 운동방정식인 식 (15)를 다음과 같이 바꾸어 쓸 수가 있다.

$$\begin{aligned} x(s + \Delta s) &= x(s) + d \cdot \cos[\theta(s) + \Delta \frac{\theta}{2}] \\ y(s + \Delta s) &= y(s) + d \cdot \sin[\theta(s) + \Delta \frac{\theta}{2}] \\ \theta(s + \Delta s) &= \theta(s) + \Delta \theta \end{aligned} \quad (19)$$

일반적으로 안정한 경로는 경로곡률이 제어된다면 생성할 수 있다. 특히, 경로는 t 가 ∞ 로 감에 따라 $(D, \Delta K, \Delta \theta)$ 가 0이 된다면 원하는 어떤 경로로 복귀하도록 명령이 내려지고 생성된다. 여기서 D 는 현재의 위치와 원하는 경로와의 수직거리이고, ΔK 와 $\Delta \theta$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta K = (K - K_{im}) \quad (20)$$

$$\Delta \theta = (\theta - \theta_{im}) \quad (21)$$

곡률은 경로변수의 연속함수가 되기 위해 우리가 조종함수라 부르는 $\frac{dK}{ds}$ 의 사양에 의해서 제어된다.

$$\frac{dK}{ds} = f(q, P, s) \quad (22)$$

$\Delta K, \Delta \theta, D$ 는 아래와 같이 주어진 안정한 경로 제어에 의해 0으로 강제적으로 수렴하게 된다.

$$\frac{dK}{ds} = -(a \cdot \Delta K + b \cdot \Delta \theta + c \cdot D) \quad (23)$$

$K = \frac{\Delta \theta}{\Delta s}$ 이고, 방향의 작은 오차들은 $\Delta \theta = \frac{dD}{ds}$ 이라 하면, 미분방정식은 다음과 같이 간략화 된다.

$$\begin{aligned} D''' + aD'' + bD' + cD &= 0 \\ (\rho^3 + a\rho^2 + b\rho + c\rho)D &= 0 \\ (\rho + k)^3 &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 a, b, c 는 양의 정수이다.

$$a = 3k, \quad b = 3k^2, \quad c = k^3 \quad (25)$$

여기서 k 는 정수이다. 그러면 이 방정식의 해는 아래와 같은 형을 갖는다.

$$D = f(s)e^{-ks} \quad (26)$$

여기서 $s \rightarrow \infty$ 에 따라 $D \rightarrow 0$ 가 된다. 이것은 조종함수를 3차 자유함수에서 1차 자유함수로 감소시키고, k^{-1} 는 특정 길이가 된다. 이 k 는 지정된 경로로 빠르게 혹은 부드럽게, 또한 안정된 결과를 보장하기

위해 빨리나 천천히 주어지는 제어의 민감도를 조정한다. k가 작아질수록 덜 민감하게 되고, 지정된 경로에 더 천천히 도달한다. k가 커질수록 경로는 지정된 경로에 더 빨리 수렴하게 된다.

일단 $\frac{dK}{ds}$ 가 계산되어지면 지정된 경로에 들어가기 위해 현재의 경로곡률(K)을 바꾸는데 사용되어진다. 오일러 적분법을 사용하여 다음 구간에서의 K는 식 (27)을 통하여 구해진다.

$$K(i) = K(i-1) + \left(\frac{dK}{ds}\right) \cdot \Delta s \quad (27)$$

여기서 Δs 는 경로길이의 증분이다.

곡률변화와 관련된 원점의 변화($\Delta \theta$)는 아래와 같이 계산되어진다.

$$\Delta \theta(i) = K(i) \cdot \Delta s \quad (28)$$

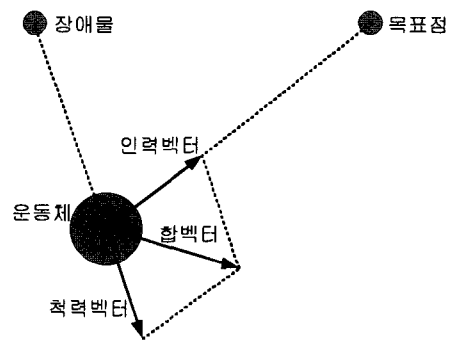
식 (15)를 사용하면, 다음 경로위치가 현재의 원점 변화와 경로 길이의 증분으로 계산되어질 수 있다. 이들 방정식을 이산 시간으로 바꾸면 식 (29)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x(i+1) &= x(i) + U(i) \cdot \cos\left[\theta(i) + \dot{\theta}(i) \frac{dt}{2}\right] \\ y(i+1) &= y(i) + U(i) \cdot \sin\left[\theta(i) + \dot{\theta}(i) \frac{dt}{2}\right] \\ \theta(i+1) &= \theta(i) + \dot{\theta}(i)dt \end{aligned} \quad (29)$$

이 과정은 전 영역에 걸쳐 수행된다.

4.2 APFM을 이용한 국부경로 생성⁽⁸⁾

인공 전위계 기법의 기본 개념은 간단히 수중운동



[그림 4] Concept of Potential Field Method

체가 있는 작동 공간에 목표점은 인력 극점(attractive pole)이고, 장애물을 반향 표면(repulsive surface)으로 하는 인공 전위계를 설정하여 장애물 회피 경로를 생성하는 것이다.

그림 4와 같이 장애물과 수중운동체, 그리고 목표점 사이에 인력, 척력의 전위가 생성이 되어 수중운동체가 진행하고자 하는 방향의 합벡터를 생성시킬 수 있다. 이런 가상의 방향벡터들이 수중운동체가 운동하게 되는 전 영역에서 구성되어지고 이 벡터들을 따라서 수중운동체는 목표점을 향한 운동을 하게 된다. CPGM에서 APFM으로 경로계획이 바뀐 순간의 수중운동체의 위치를 바탕으로 각 장애물의 위치와 수중운동체 사이에 작용하는 척력벡터와 수중운동체와 목표점 사이에 작용하는 인력벡터를 계산하여 장애물을 회피하기 위한 경로를 생성한다. APFM에서 각 인력벡터와 척력벡터는 인력, 척력 전위함수에 대하여 식 (30)과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} F_o &= -\text{grad}[U_o(X)] \\ F_g &= -\text{grad}[U_g(X)] \end{aligned} \quad (30)$$

여기서 U_o 와 U_g 는 척력 및 인력 전위함수, F_o 와 F_g 는 척력 및 인력벡터이다.

따라서 인력, 척력 벡터를 정의하기 위해서는 인력, 척력 전위함수의 결정이 우선되어야 한다. 전통적인 PD 서보에서 인력벡터는 비례항 즉 $-k_p(A_p - G_p)$ 이므로 인력 전위함수는 간단히 식 (31)과 같이 표현할 수 있다.

$$U_g = \frac{1}{2} k_p (A_p - G_p)^2 \quad (31)$$

여기서 k_p 는 위치이득 이고, A_p 와 G_p 는 AUV와 장애물의 위치를 나타낸다.

본 논문에서는 시스템에 적합한 전위함수의 설계가 목적이 아니라 그 적절한 사용이기 때문에 척력 전위함수는 기존에 제시되었던 함수를 사용하였다. 여기서 사용하는 척력 전위함수는 식 (32)와 같이 정의한다.

$$U_o(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{D(X)} - \frac{1}{D_o} \right)^2 & \text{if } D(X) \leq D_o \\ 0 & \text{if } D(X) > D_o \end{cases} \quad (32)$$

여기서 $D(X)$ 는 주어진 장애물과의 거리를 나타내는 거리함수이고, D_o 는 원하는 회피반경이고, η 는 이득상수 이다.

이 거리함수를 표현하는 방식에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 본 논문에서는 도플러 효과를 이용한 거리함수를 이용하였다. 도플러 효과를 이용해 정의된 $D(X)$ 는 식 (33)과 같다.

$$D(X) = \frac{h}{f} \quad (33)$$

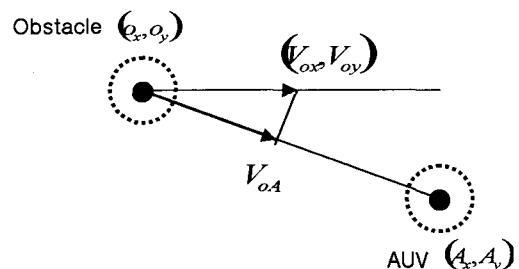
여기서 h 는 장애물과 수중운동체 사이의 직선 거리이고, f 는 장애물과 수중운동체 사이에 발생하게 되는 파장이다. 이 파장은 h 가 작아질수록 장애물과 수중운동체 사이에 발생하는 전위가 커지게 되고, h 가 커질수록 장애물과 수중운동체 사이의 전위가 작아지게 된다. 이 파장을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$f = f_0 \left(\frac{v \pm v_{oA}}{v} \right) \quad (34)$$

여기서 v_{oA} 는 장애물과 수중운동체 사이의 상대속도를 나타내고, v 는 수중운동체가 운동하고 있는 공간상에서의 음파의 진행속도이다. 상대속도 v_{oA} 는 또한 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_{oA} = \frac{v_{ox}(A_x - o_x) + v_{oy}(A_y - o_y)}{\sqrt{(A_x - o_x)^2 + (A_y - o_y)^2}} \quad (35)$$

이상의 관계를 이용하여 장애물과 수중운동체 사이에 발생하는 척력 전위함수를 정의하는데 필요한 거리함수가 정의된다. 이렇게 정의된 거리함수를 이용하여 인력과 척력의 전위함수가 만들어지게 되고, 이를 바탕으로 인력과 척력 벡터가 계산되어져 수중운동체의 다음 진행 방향을 알 수 있게 된다.



[그림 5] Correlation of AUV with Obsatcle

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 장에서는 기존에 제시된 CPGM과 APFM과 본 논문에서 구성한 방식인 CAPM을 이용하여 여러 경우의 장애물 배치에 대한 경로생성 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과에 대한 비교 분석과 고찰을 하였다.

5.1 시뮬레이션 조건

제한한 장애물 회피 경로생성기의 성능평가를 위한 시뮬레이션 수행을 위하여 아래와 같이 가정하였다.

- (1) 운동체를 구성 공간상에 구속되는 한 점으로 설정하여 인공 전위계에의 적용을 쉽게 하였다.
- (2) 장애물의 형상에 관계없이 일정 회피 영역을 요구하는 반경을 가진 원으로 가정하여 장애물이 임의의 불규칙적인 형상을 가졌다 하더라도 요구되는 반경 내에 다 포함시킬 수 있도록 하였다.
- (3) 운동체가 작업을 수행하는 공간에 의한 외란 요소는 배제하였다.
- (4) 운동체의 장애물 감지 능력은 우수하다.
- (5) 시뮬레이션에 이용되는 장애물은 알려진 고정 장애물로 한다.

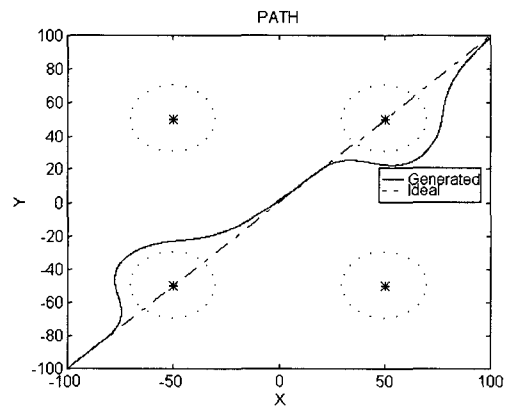
이 조건을 가지고 본 논문에서는 여러 가지의 각기 다른 장애물 배치 상황을 설정하여 각 경로 생성 알고리즘에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째 배치는 적당한 거리를 둔 균일하게 분포한 네 개의 장애물이 있는 경우이다. 두 번째 배치는 아홉 개의 장애물로 회피 반경이 서로 겹치는 경우이다. 이 경우에는 장애물 사이의 거리가 30m이다. 세 번째 배치는 두 번째 보다 좀 더 좁게 장애물을 배치시켰다. 이 경우에는 장애물 사이의 거리가 20m이다. 마지막 네

번째 배치는 불규칙적으로 10개의 장애물이 이동 공간상에 분포하고 있는 경우이다.

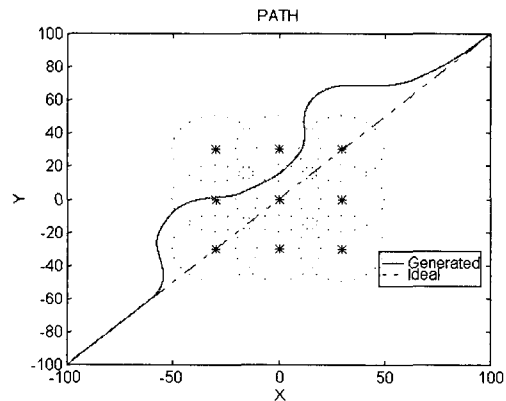
5.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

(1) CPGM을 이용한 경로생성

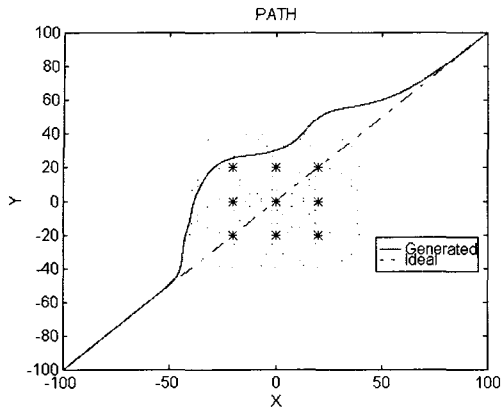
그림 6에서 나타난 바와 같이 CPGM이 아주 양호하게 경로를 추종하면서 장애물을 피해 목표점에 도달하도록 하는 경로를 생성시킴을 알 수 있다. 전체적인 경로의 구성이 부드러워서 수중운동체의 급격한 운동을 발생시키지 않음을 알 수 있다. 하지만



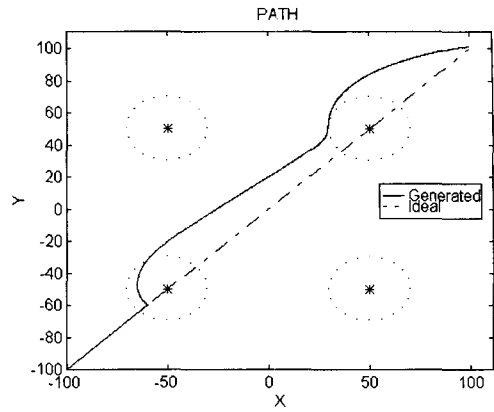
[그림 6] Result of CPGM case 1



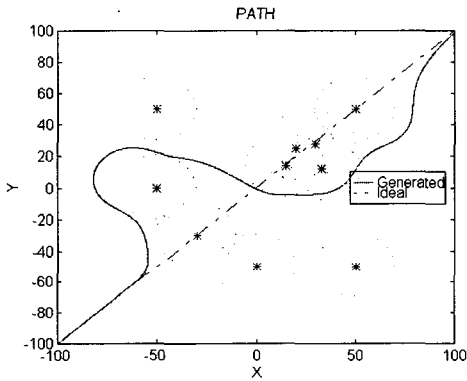
[그림 7] Result of CPGM case 2



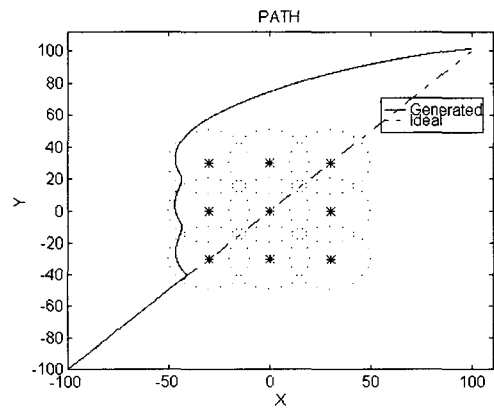
[그림 8] Result of CPGM case 3



[그림 10] Result of APFM case 1



[그림 9] Result of CPGM case 4

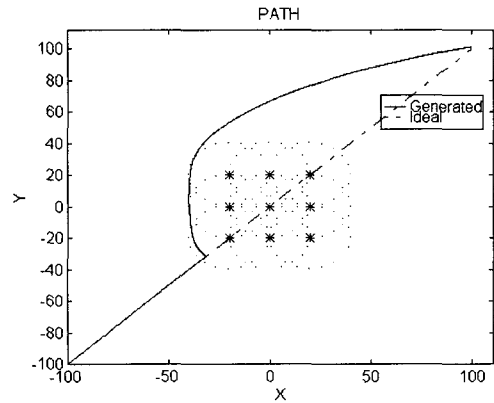


[그림 11] Result of APFM case 2

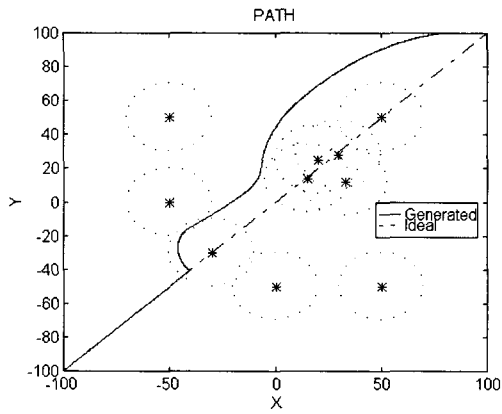
CPGM의 문제점이 그림 7과 8에 잘 나타나 있다. 장애물 사이가 30m로 안전 회피반경이 20m인 시뮬레이션 상에서는 지나가서는 안 된다. 하지만 결과에서 보듯이 CPGM에서는 장애물 사이의 겹쳐진 영역을 지나가면서 장애물과 부딪히는 경로를 생성하게 된다.

(2) APFM를 이용한 경로생성

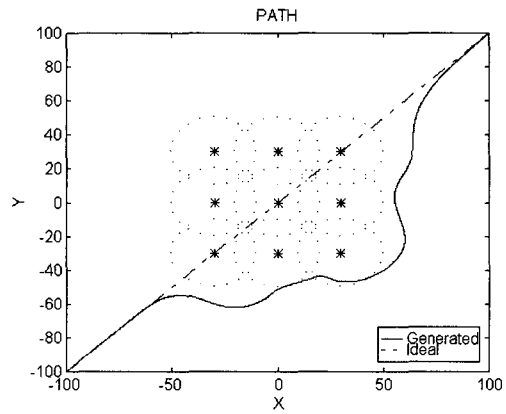
전체적으로 APFM에 의해 생성된 경로는 CPGM에 비해 장애물에 대하여 안전한 회피경로를 생성시킴을 보여준다. 그림 11과 12에서 장애물들 사이의 거



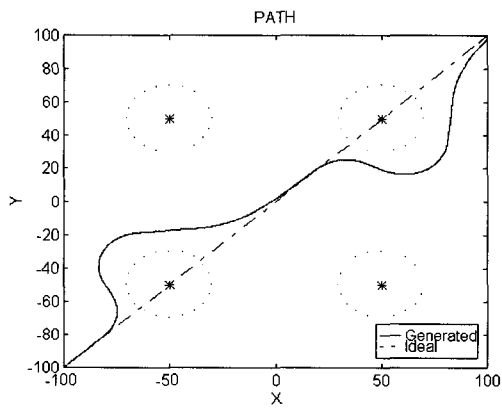
[그림 12] Result of APFM case 3



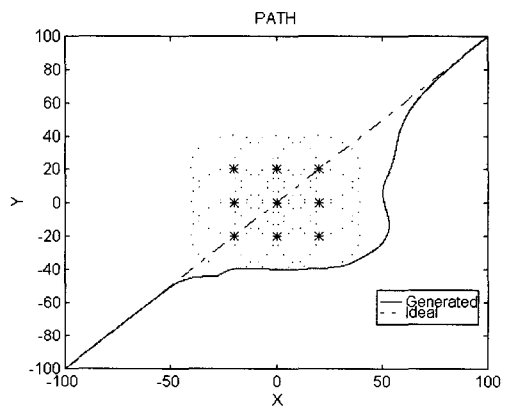
[그림 13] Result of APFM case 4



[그림 15] Result of CAPM case 2



[그림 14] Result of CAPM case 1

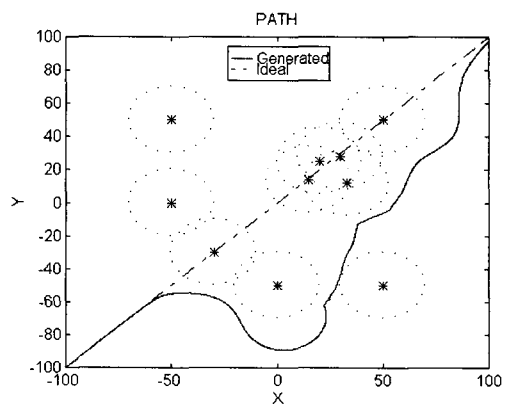


[그림 16] Result of CAPM case 3

리가 회피반경 이내의 경우인데 이 때 장애물들을 우회하는 안전한 경로를 생성시킨다. 그러나 장애물 회피 후 목표점으로의 경로는 CPGM에 비하여 최단 경로 생성이라는 측면에서 성능이 떨어짐을 알 수 있다.

(3) CAPM을 이용한 경로생성

그림 14에서 그림 17까지가 본 논문에서 제시한 경로생성기인 CAPM의 시뮬레이션 결과이다. 각 경우에 있어 이전에 제시된 알고리즘들에 비하여 양호한 경로생성 능력을 보임을 알 수 있다. 그림 15와 16에



[그림 17] Result of CAPM case 4

서 보는바와 같이 CPGM의 단점을 보완하여 안전한 회피경로를 생성시키고 있음을 결과를 통해서 알 수 있다. 또한 장애물 회피 후 목표점 도달 거리면에서 단순히 APFM 만을 사용하였을 때보다 짧은 경로생성을 하였음을 알 수 있다. 그림 17에서도 마찬가지로 두 알고리즘의 장점을 잘 조화시킨 결과를 보여주고 있다.

6. 결 론

수중운동체가 제시된 작동 공간상에서 장애물 회피 동작을 수행하는데 얼마나 안전한 경로를 생성하는가와 얼마나 짧은 거리를 만들어 내는가의 두 가지 문제를 고려해야 한다. 이 두 가지 문제는 서로 상충되는 면을 갖고 있다. 경로의 안전성을 위해서는 우회하는 경로를 택하게 되고, 경로를 우회하게 될수록 짧은 거리의 측면에서는 벗어나기 때문이다. 이에 본 논문에서는 두 가지의 문제를 고려하여 수중운동체가 작업 공간 내에서 최대한 안전하면서 짧은 경로를 생성하는 알고리즘인 CAPM을 구성하여 가능성을 검토하였다.

CPGM과 APFM의 병용 방식인 CAPM이 장애물 환경 하에서의 양호한 최적 회피경로를 생성하는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 생성된 경로의 안전성면에서는 CPGM의 접치는 회피반경을 양분하는 단점을 APFM을 사용하여 장애물 회피 성능을 갖도록 하였고, 경로의 거리면에서는 APFM에 비하여 양호한 경로 추종성을 갖는 CPGM을 사용하여 짧은 거리를 만들도록 하였다. 따라서 전체 공간을 두 부분으로 구분하여 각 구간에서 최적의 계산량을 갖도록 하여 CPGM과 APFM을 단독으로 사용한 경우에 비

하여 양호한 장애물 회피 경로생성을 하였다. 이것은 제안된 방식이 AUV의 경로생성기로서 적용성이 가능하리라 판단된다. 앞으로 미지의 이동 장애물에 대한 회피동작에 대한 보완연구와 실제 AUV에 적용을 통한 성능검증이 이루어져야 할 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

1. F. Busby and J.R. Vadus, "Autonomous Underwater Vehicle R&D Trends", Sea Technology, pp. 65~73, 1990.
2. T. Lozano-Perez, "A simple motion planning algorithm for general robot manipulators", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 3, pp. 224~238, 1987.
3. Kamel Kant, Steven W. Zucker, "Toward efficient trajectory planning : The path-velocity decomposition", International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, pp. 72~89, 1986.
4. Elmer G. Gilbert, Daniel W. Johnson, "Distance function and their application to robot path planning in the presence of obstacles", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-1, No. 1, pp. 21~30, 1985.
5. Ching L. Shih, Tsu-Tian Lee, William A. Gruver, "A Unified Approach for Robot Motion Planning with Moving Polyhedral Obstacles", IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 4, pp. 903~915, 1990.
6. 전홍주, 거리 함수를 이용한 로봇의 시변 장애물 회피 동작 계획, 석사학위논문, 서울대학교, 1992.

7. W. Nelson, "Continuous-curvature paths for Autonomous vehicles", proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1260~1264, 1989.
8. Oussama Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," The International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, pp. 90~98, 1986.
9. 양승윤, "슬라이딩 모드 제어를 이용한 무인 수중 운동체의 강인한 추적장치 설계," 대한전기학회논문지, 제47권 2호, pp. 222~230, 1998.
10. W. B. Gao et al, "Variable structure control : a survey," IEEE Trans. Electron., Vol. 40, No. 1, pp. 2~22, 1993.