

이산 가변구조제어기를 이용한 자율무인잠수정의 심도제어

이 판 목* · 홍 석 원* · 전 봉 환*
(97년 5월 26일 접수)

Depth Control of an Autonomous Underwater Vehicle with System Uncertainties Based on Discrete Variable Structure System

Pan-Mook Lee, Seok-Won Hong, Bong-Hwan Jeon

Keywords : Discrete Control(이산제어), VSS(가변구조시스템), Quasi-Sliding Mode(의사-슬라이딩 모드), Parameter Uncertainty(불확실성), AUV(자율무인잠수정)

Abstract

This paper presents a discrete-time sliding mode control of an autonomous underwater vehicle with parameter uncertainties and long sample interval based on discrete variable structure system. Although conventional sliding mode control techniques are robust to system uncertainties, in the case of the system with long sample interval, the sliding control system reveals chattering phenomenon and even makes the system unstable. This paper considers the AUV which acquires position informations from a surface ship through an acoustic telemetry system with a certain discrete interval. The control system is designed on the basis of a Lyapunov function and a sufficient condition of the switching gain to make the system stable is given. Each component of the switching gain can be determined separately one another. The controller is robust to the uncertainties, and reaching condition of the control system is satisfied for any initial condition. This control law is a generalized form of the discrete sliding mode control and reduce the chattering problem considerably. Motion control of the AUV in the vertical plane shows the effectiveness of the proposed technique.

1. 서 언

자율무인잠수정 (AUV, Autonomous Underwater Vehicle)은 해양의 열악한 환경하에서 자율

항주하면서 임무를 완수하고 회귀해야 하기 때문에 불확실성에 대하여 강인한 제어시스템이 요구된다. 이러한 AUV의 제어를 위하여 고전적인 제어방법을 이용하는 경우에는, AUV의 운동특성을

* 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

정확히 파악하고 시스템의 모든 파라미터를 실험과 이론계산으로 추정하여 모델링하는 것이 요구된다. AUV의 운동계수는 운항속도, AUV의 자세, 방향타 및 수평타의 각도 등에 의해 동특성이 변화되며, 해조류의 영향에 의한 상대속도 변화에 기인하는 양력의 변화등이 시스템의 동특성에 미치는 영향이 크다. 따라서, 고전적인 방법에 의한 제어 시스템은 시스템의 모델링이 정확히 이루어졌다 하더라도, 운항상태 변화에 따른 제어 계인의 스케줄링이 필요하고 이의 강인성을 보장하기가 용이하지 않다.

슬라이딩 모드 제어기는 불확실성을 갖는 시스템의 제어에 적합하며, 다양한 분야에서 이 방법을 이용하여 성공적으로 제어기를 구성한 많은 연구사례가 보고되었다. Yoerger 등¹⁾은 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 ROV(Remotely Operated Vehicle)의 운동제어를 강인하게 수행하는 것을 연구하였고, Cristi 등²⁾은 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 AUV의 수직면 운동 제어를 수행한 바 있다. 이들은 수중선체의 운동제어를 보다 강인하게 수행하기 위하여 시스템 파라미터를 추정하거나 상태변수를 추정하는 방법으로 연구를 진행하였다. 국내에서도 Sur³⁾가 이 방법을 이용한 AUV의 운동 제어 결과를 발표한 사례가 있다.

기본적으로 슬라이딩 모드 제어기는 고주파수의 스위칭에 의하여 제어시스템의 안정성을 확보하는 방법이며, 이러한 고주파수의 채터링을 줄이기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있으며, Slotine⁴⁾의 스위칭 면 근처에 경계역을 설정하여 이 영역에서는 선형적으로 스위칭하는 방법이 기본적이다. 슬라이딩 모드 제어기가 불확실성에 강인한 제어시스템이라 하여도, 샘플링 간격이 길어질 경우에는 연속 시스템에 대하여 채터링 방지기능을 갖도록 설계된 슬라이딩 모드 제어기도 채터링을 유발하게 되며, 종국에는 시스템이 불안정해지는 결과를 보이기도 한다. 따라서, 샘플링이 시스템의 다이내믹스에 비하여 상대적으로 긴 시스템은 이산 시스템에 대한 이산 슬라이딩 모드제어기를 구성하는 것이 요구된다.

본 논문은 AUV의 위치를 수상선에서 수중부선 모델을 통하여 전송하고 이를 이용하여 궤도를 추

적하는 시스템, 또는 AUV가 수중에서 전방향 시각 소나를 이용하여 해저 지형을 실시간으로 판독하며 자율항주하는 경우에 대하여 강인 제어를 구성하는 방법에 관한 것이다. 수중 무선모뎀에 의한 데이터 전송은 데이터 전송량, AUV와 수상선의 거리, 에러복구기능 여하에 따라 수 초에서 십여 초에 이르는 시간 간격이 소요된다. 또한 전방향 시각 소나를 이용하여 해저 지형정보를 얻는 시간 간격은 대략 수 초가 소요되므로, 이러한 시스템에 대하여 강인 제어를 설계하기 위해서는 이산 슬라이딩 모드 제어법이 요구된다.

이산시스템에 대한 가변구조 제어기에 관한 연구는 Milosavljevic⁵⁾이 의사-슬라이딩 모드 제어에 대하여 처음으로 언급하였고, 이후 Sarpturk⁶⁾, Kotta⁷⁾ 등이 이산 슬라이딩 모드의 안정성에 대해 연구하였고, 제어력의 하한 뿐만 아니라 상한이 존재한다는 점을 지적하였다. Furuta⁸⁾ 및 Chan⁹⁾은 연속시스템과 연관시켜 이산시스템의 슬라이딩 모드 제어를 안정하게 설계하기 위한 충분조건을 제시하였다. Sira-Ramirez¹⁰⁾, Hwang¹¹⁾, Pieper¹²⁾ 등에 의하여 출력 제한에 의한 이산 가변구조 제어에 대한 연구가 진행되었고, 비선형적인 문제에 적용한 사례가 보고되었다. Chan¹³⁾은 모델링 오차와 교란이 존재하는 입출력 모델에 대하여 이산 슬라이딩 모드 추적제어기를 제안하였다. 이외에도 Misawa¹⁴⁾는 적응변수 추정법을 이용하여 이산 슬라이딩 제어에 관하여 연구한 결과가 있고, Tesfaye¹⁵⁾는 이산 시스템의 샘플링 간격이 작아질 경우의 슬라이딩 모드에 관하여 논하였다.

본 논문은 Furuta⁸⁾가 제시한 방법을 일반화시켜서 설계된 절환면에 근접한 상태를 유지하는 제어 특성을 갖는 시스템을 구현하였고, 궤도추적이 가능하도록 확장하였으며, 이의 안정성을 Lyapunov 함수를 이용하여 검증하였다. 본 논문의 방법은 임의의 초기상태에서 절환면에 도달할 수 있는 조건을 안정적으로 만족시키며, 절환면 근처에 도달한 후에 연속계와는 달리 고주파수의 절환을 수행하지 않고 선형적인 제어를 수행하여 채터링을 감소시키면서, 또한 시스템의 불확실성에 강인한 특성을 보인다. 절환면에서 주어진 조건을 벗어날 때 적용하는 고주파수 성분은 Furuta⁸⁾ 및 Chan⁹⁾의 경

우보다 현저히 작게 작용하여 불필요한 고주파수의 운동을 방지할 수 있다.

제안된 이산 가변구조제어 방법을 이용하여 AUV의 수직면 내의 심도제어에 적용하였다. AUV 시스템의 불확실성은 시간에 따라 변화하기도 하고 작업조건에 따라 크게 바뀌기도 한다. 이러한 불확실성에 강인한 이산 가변구조 제어기를 구성하여, 기존의 연속계에 대해 설계된 슬라이딩 모드 제어기와 샘플링 간격의 변화에 따른 영향을 비교 검토하여 실용성을 검증하였다.

2. 이산 가변구조 제어기

일정시간 간격으로 계측데이터가 주어지는 단일입력다중출력(SIMO) 시스템에 대하여 이산 상태방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + \Gamma(k)u(k) \quad (1)$$

여기서, $u(k)$ 는 k 번째 시간 스텝에서의 스칼라이고, $x(k)$ 는 n 차원 벡터를 나타낸다. 시스템 계수 $\Phi(k)$ 는 불확실성을 포함하는 시변함수이고, $\Gamma(k)$ 는 기지의 상수행렬이라고 가정한다. $\Phi(k)$ 는 상수행렬 Φ_0 를 중심으로 변화한다고 가정하면, Φ_0 에 오차항 $\Delta\Phi(k)$ 가 포함된 형태로 나타낼 수 있다.

$$\Phi(k) = \Phi_0 + \Delta\Phi(k) \quad (2)$$

시스템의 불확실성이 매칭조건 (matching condition)¹⁶⁾을 만족한다면, $\Delta\Phi(k)$ 는 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\Phi(k) = \Gamma d(k)^T \quad (3)$$

여기서 $d_k^T = [d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{kn}]$. 이 불확실성이 모든 시간 스텝에서 일정한 범위내의 값을 갖고 각각의 최대값을 알 수 있다면, 새로운 벡터 D 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D^T = [D_1, D_2, \dots, D_n]$$

여기서 각각의 D_i 는 양의 상수로서, 모든 시간 스텝에서 각각의 불확실성 보다 크다는 조건을 만족

한다.

$$D_i > |d_{ki}| \quad \text{for } \forall k \text{ and } i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

식 유도과정의 간편성을 위하여 d_k 를 d_i 로 나타낸다. 시스템이 추적해야할 궤적이 $r(k)$ 로 주어진다면, 오차벡터는 다음과 같이 정의되고,

$$e(k) = x(k) - r(k) \quad (5)$$

가변구조 제어 시스템의 슬라이딩 면 $s(k)$ 는 다음으로 설계될 수 있다.

$$s(k) = G^T e(k) \quad (6)$$

여기서 G 는 슬라이딩 면상에서 시스템의 다이내믹스가 안정하도록 설계되어진다.

시스템이 슬라이딩 면 상에 존재할 경우에, 연속 시스템의 슬라이딩 조건인 $\dot{s}=0$ 조건에 대응되는 이산 슬라이딩 조건은 $s(k+1)=s(k)$ 로 나타낼 수 있으며, 식(1), (2), (5) 및 (6)을 이용하면, 제어 입력은 다음으로 얻어진다.

$$u(k) = -(G^T \Gamma)^{-1} G^T \{ [\Phi_0 + \Delta\Phi(k) - I]x(k) - [r(k+1) - r(k)] \} \quad (7)$$

연속시스템의 슬라이딩 제어와 유사한 방법으로 써 제어입력은 등가의 제어입력과 스위칭 제어입력으로 나누어 나타낼 수 있다고 가정하고, 새로운 변수 $\alpha = G^T \Gamma$ 와 $\Delta r(k+1) = r(k+1) - r(k)$ 를 정의하면 등가입력은 다음으로 표현된다.

$$u_{eq}(k) = -\alpha^{-1} G^T \{ (\Phi_0 - I)x(k) - \Delta r(k+1) \} \quad (8)$$

식(1), (5) 및 (8)을 이용하면 등가제어시스템의 오차 다이내믹스는 다음으로 얻어진다.

$$e(k+1) = [\Phi_0 - \frac{1}{\alpha} \Gamma G^T (\Phi_0 - I)]e(k) + (I - \frac{\Gamma G^T}{\alpha}) [(\Phi_0 - I)r(k) - \Delta r(k+1)] \quad (9)$$

주어진 궤적 $r(k)$ 에 대하여, G 는 등가제어시스템 (9)가 안정적이며, 슬라이딩 면 $G^T e(k)=0$ 이 안정적이 되도록 설계되어야 한다.

불확실성을 갖는 시스템이 임의의 상태에서 슬라이딩면에 수렴하고, 이 슬라이딩 면상에 시스템의 상태를 계속 유지하기 위한 이산 슬라이딩 제어를 구성하고자 한다. 플랜트가 주어진 궤적을 추적하기 위한 제어를 문헌⁸⁾에서 제시된 형태를 변형하여 다음과 같이 제안하였다.

$$u(k) = -\frac{1}{\alpha} G^T (\Phi_0 - I)x(k) + \frac{1}{\alpha} G^T \Delta r(k+1) + \phi^T e(k) - \phi_0 s(k) \quad (10)$$

여기서 식 우측의 첫째항은 등가제어입력항, 둘째는 궤도보정항, 셋째는 비선형 스위칭항이고, 마지막은 강인성 개선을 위하여 도입된 슬라이딩 면에 대한 선형제어항이다. ϕ 및 ϕ_0 는 결정되어져야 할 제어이득이다.

궤도추적을 위한 이산 가변구조제어기가 안정적이기 위한 ϕ 와 ϕ_0 의 결정조건에 대하여 기술하고자 한다. 제어시스템의 안정성을 판별하기 위하여 Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의하고,

$$V(k) = s(k)^2 \quad (11)$$

k번째와 k+1 번째의 슬라이딩 면 거리의 차를 $\Delta s(k+1) = s(k+1) - s(k)$ 로 정의하였다. 이산 시스템의 슬라이딩 모드가 존재하는 조건으로서 연속시스템의 $\dot{V} < 0$ 에 대응하여, 시간 스텝 증가에 따라 Lyapunov 함수가 감소하는

$$\begin{aligned} \Delta V(k+1) &= V(k+1) - V(k) \\ &= 2s(k)\Delta s(k+1) + \Delta s(k+1)^2 \quad (12) \\ &< 0 \end{aligned}$$

조건이 만족되어야 한다. 식(1), (2) 및 (10)을 이용하면 오차방정식이 다음으로 얻어진다.

$$\begin{aligned} e(k+1) &= [\Phi_0 - \frac{\Gamma G^T}{\alpha} (\Phi_0 - D)]e(k) \\ &+ (I - \frac{\Gamma G^T}{\alpha})[(\Phi_0 - D)r(k) - \Delta r(k+1)] \quad (13) \\ &+ \Delta \Phi x(k) + \Gamma \phi^T e(k) - \Gamma \phi_0 s(k) \end{aligned}$$

새로운 변수 ρ 를 $\rho = \phi_0(G^T \Gamma)$ 로 정의하고, 식(3)과 (13)을 식(6)에 대입하면, k+1 번째 스텝에서의 $s(k+1)$ 은 다음으로 얻어진다.

$$s(k+1) = \alpha(\phi^T + d^T)e(k) + (1-\rho)s(k) + \alpha d^T r(k) \quad (14)$$

따라서, $s(k)$ 의 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta s(k+1) = \alpha(\phi^T + d^T)e(k) - \rho s(k) + \alpha d^T r(k) \quad (15)$$

식(14)와 (15)를 이용하여 Lyapunov 함수의 변화량 관계식 (12)는 다음으로 정리된다.

$$\begin{aligned} \Delta V(k+1) &= [\sum_{i=1}^n \alpha(\phi_i + d_i)e_i(k) + \sum_{i=1}^n \alpha d_i r_i(k)]^2 \\ &- [\sum_{i=1}^n \alpha d_i r_i(k)]^2 \\ &+ 2(1-\rho) \sum_{i=1}^n \alpha(\phi_i + d_i)e_i(k)s(k) \\ &+ [(1-\rho)s(k) + \sum_{i=1}^n \alpha d_i r_i(k)]^2 - s(k)^2 \quad (16) \end{aligned}$$

다음의 정리를 만족하면 불확실성을 갖는 시스템이 안정적으로 궤도추적을 수행하는 이산 가변구조제어기가 얻어진다.

정리 : 이산 시스템의 시스템 행렬 Φ 가 갖는 불확실성 $\Delta \Phi(k)$ 가 매칭조건 식(3)을 만족하고 각각의 불확실성이 식(4)를 만족하게 유한(bound)하고, 다음의 두 조건을 만족한다면, 제어입력을 식(10)으로 갖는 이산 시스템은 최종유한(ultimately bound)하다.

$$\begin{aligned} (i) \quad &0 < \rho < 1 \\ (ii) \quad &\phi_i = \begin{cases} F_i & \text{if } \alpha e_i(k)s(k) < -\delta; \\ 0 & \text{if } -\delta < \alpha e_i(k)s(k) < \delta; \\ -F_i & \text{if } \alpha e_i(k)s(k) > \delta; \end{cases} \quad (17) \end{aligned}$$

for $i = 1, \dots, n$

여기서, 각각의 등가제어 경계 δ_i 는

$$\delta_i = \frac{\alpha^2 |e_i(k)|}{2(1-\rho)} \left[\sum_{j=1}^n (F_j + D_j) |e_j(k)| + 2 \sum_{j=1}^n |D_j r_j(k)| \right] \quad (18)$$

으로 주어지며, 각각의 $F_i > D_i > 0$ 는 일정 상수이다.

증명 : 스위칭면 밖에 시스템이 존재하면 ϕ_i 가 F_i 또는 $-F_i$ 를 갖게되므로, $|\phi_i| > |d_i|$ 조건이 항상 성립한다. 따라서, $(\phi_i + d_i)$ 의 부호는 ϕ_i 의 부호에 좌우된다. 식(17)과 (18)을 식(16)에 대입하면 Lyapunov 함수의 변화량은

$$\begin{aligned} \Delta V(k+1) &\leq \left[\sum_{i=1}^n \alpha(\phi_i + d_i)e_i(k) + \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 \\ &\quad - \left[\sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 - 2(1-\rho) \sum_{i=1}^n |\phi_i + d_i| \delta_i \\ &\quad + \left[(1-\rho)s(k) + \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 - s(k)^2 \\ &= \left[\sum_{i=1}^n \alpha(\phi_i + d_i)e_i(k) + \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 \\ &\quad - \left[\sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 \\ &\quad - \alpha^2 \sum_{i=1}^n |\phi_i + d_i| |e_i(k)| \sum_{j=1}^n (F_j + D_j) |e_j(k)| \\ &\quad - 2\alpha^2 \sum_{i=1}^n |\phi_i + d_i| |e_i(k)| \sum_{j=1}^n |D_j r_j(k)| \\ &\quad + \left[(1-\rho)s(k) + \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 - s(k)^2 \quad (19) \end{aligned}$$

으로 주어진다. 부등식 $(F_j + D_j) > |\phi_j + d_j|$ 를 이용하고, 부등식 $\sum_{j=1}^n |D_j r_j(k)| > \sum_{j=1}^n |d_j r_j(k)|$ 를 이용하면 식(19)는 다음 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} \Delta V(k+1) &< \left[\sum_{i=1}^n \alpha(\phi_i + d_i)e_i(k) + \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 \\ &\quad - \left[\sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 - \text{left} \left[\sum_{i=1}^n |\alpha(\phi_i + d_i)e_i(k)| \right]^2 \\ &\quad - 2 \sum_{i=1}^n |\alpha(\phi_i + d_i)e_i(k)| \sum_{j=1}^n |ad_j r_j(k)| \\ &\quad + \left[(1-\rho)s(k) + \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 - s(k)^2 \\ &= \left[\sum_{i=1}^n \alpha(\phi_i + d_i)e_i(k) + \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 \\ &\quad - \left[\sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 \\ &\quad - \left[\sum_{i=1}^n |\alpha(\phi_i + d_i)e_i(k)| + \sum_{i=1}^n |ad_i r_i(k)| \right]^2 \\ &\quad + \left[\sum_{i=1}^n |ad_i r_i(k)| \right]^2 \\ &\quad + \left[(1-\rho)s(k) + \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 - s(k)^2 \quad (20) \end{aligned}$$

따라서, Lyapunov 함수의 변화량은

$$\begin{aligned} \Delta V(k+1) &< \left[\sum_{i=1}^n |ad_i r_i(k)| \right]^2 - \left[\sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 \\ &\quad + \left[(1-\rho)s(k) + \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right]^2 - s(k)^2 \quad (21) \end{aligned}$$

관계식으로 유도된다. 여기서, 시스템의 오차가 없는 경우에는 $\Delta V(k+1)$ 이 항상 0 보다 작고, 시스템의 오차가 존재하는 경우에는 $s(k)$ 가 다음식으로 정의되는 집합체 S_ρ 밖의 영역에 존재하는 경우에는 Lyapunov 함수의 변화량이 0 보다 작다.

시스템이 유한한 불확실성을 갖고 바운드되는 제어신호에 대하여, S_ρ 는 유한한 최대값을 갖게되며, 따라서 $s(k)$ 는 S_ρ 밖의 영역에서는 항상 Lyapunov 함수의 변화량이 0 보다 작아 슬라이딩면에 수렴하게 되며, S_ρ 영역 내에서는 바운드되는 결과를 보인다. 따라서, 정리에 의한 이산 가변구조제어기는 $s(k)$ 가 안정적으로 S_ρ 에 도달하며,

$$S_\rho \equiv \left\{ s(k) : |s(k)| \leq \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{2\rho - \rho^2}{(1-\rho)^2} \left(\sum_{i=1}^n |ad_i r_i(k)| / \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right)^2}}{(2\rho - \rho^2)/(1-\rho)} \left| \sum_{i=1}^n ad_i r_i(k) \right| \right\} \quad (22)$$

S_ρ 범위 내에서 최종유한(ultimately bound)하게 된다. ■

위의 정리에 있어서, 각각의 스위칭 계인 F_i 는 다음식으로 주어지며,

$$D_i < F_i < \frac{2(1-\rho)}{a \sum_{j=1}^n |t_{ij}|} - \max \{D_i, D_2, \dots, D_n\}$$

여기서, t_{ij} 는 문헌^{8),9)}에 주어진 좌표변환형렬의 첫렬을 나타낸다.

스위칭 조건은 상태변수의 오차, 시스템의 불확실성, 및 시변 궤적의 함수로 얻어지는 δ_i 에 의해서 결정된다. 따라서, 등가 제어 영역은 상태변수 오차를 비롯하여 시스템의 불확실성 및 궤도입력 신호에 따라 좌우된다. Fig.1 은 2차 시스템에 대한 상태변환도(phase plane)를 나타낸다. 오차가 증가할수록 빗금친 부분인 등가 제어 영역이 증가하고 여기에 시변궤도 입력의 영향이 고려된 시변 등가영역을 나타내고 있다.

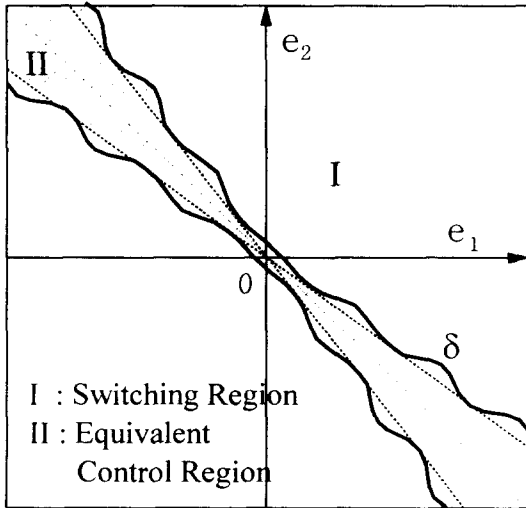


Fig. 1 Variable equivalent control region of discrete sliding mode tracking control in the presence of parameter uncertainties

불확실성을 갖는 시스템의 궤도추적에 있어서, 원점근처에서 작은 영역의 최종유한(ultimately

bound)하는 영역이 존재한다. 따라서 불확실성이 증가하고 입력이 크게 주어지면 상태변환도의 원점 근처에서 리미트 사이클(limit cycle)을 보이게 된다. 또한 ρ 가 증가하면 S_ρ 가 대략 $1/\rho$ 의 비율로 증가하게 된다. 따라서, 유한(bound) 영역을 줄이기 위해서는 $0 < \rho < 1$ 의 범위내에서 비교적 큰 값을 갖는 것이 바람직하다. 너무 큰 ρ 값을 선택하면 δ_i 가 과도하게 되어 등가 제어 영역이 증대하여 스위칭의 효과가 감소한다.

본 연구에서 유도된 등가 제어 영역의 선정법은 문헌^{8),9)}의 일반화된 형태가 된다. 본 연구의 스위칭 계인 ϕ_i 를 모든 성분에 대해 F_0 로 동일하게 정하고, D_i 를 모든 성분의 최대값 D_0 로 정하고, 궤도 입력을 0으로 정하면, 스위칭 거리 δ_i 는 다음 식으로 얻어져

$$\delta_i = \frac{a^2}{2(1-\rho)} \sum_{j=1}^n |e_j(k)| |e_i(k)| (F_0 + D_0)$$

Furuta⁸⁾의 형태가 된다. 또한, 모든 스위칭 계인이 동일하고 불확실성이 없다면, δ_i 는

$$\delta_i = \frac{F_0 a^2}{2(1-\rho)} |e_i(k)| \sum_{j=1}^n |e_j(k)|$$

Chan⁹⁾의 형태가 된다.

본 연구에서 제안된 이산 시스템에 대한 가변구조제어기를 적용함으로써 스위칭 계인 선정을 위한 일반화된 방법이 제시되었고 이의 안정성을 검증함으로써 시스템의 동특성에 비해 상대적으로 긴 샘플링 간격을 갖는 이산 시스템의 제어에로의 적용 가능성을 검증하였다.

3. 자율무인잠수정의 심도제어

본 연구의 대상 AUV는 글라이딩형으로서 좌우 대칭이며, 따라서, XZ면 내의 3자유도 운동과 수평면운동의 3자유도 운동을 분리하여 취급할 수 있다. Fig. 2는 AUV의 측면도를 나타내며, 중심에 좌표축 원점을 정하고, 전진방향이 x, 수직하방향으로 z축을 정하고, 부력 $\nabla \rho g$ 과 중력 mg 가 일치

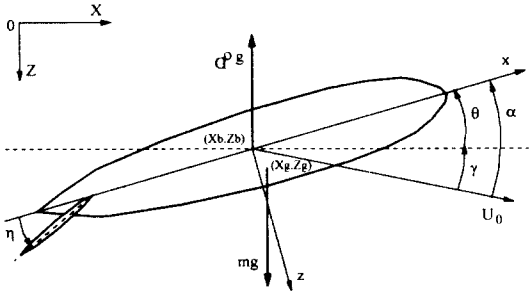


Fig. 2 Body fixed coordinates of an AUV

하며 부력중심 (x_B, z_B) , 무게중심 (x_G, z_G) 에 존재하고, 수평타 각도 η 를 제어하여 AUV의 심도를 제어하는 잠수정이다. 이러한 AUV의 형상을 생각하여 무시할 수 있는 항을 제외하면, 종방향 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(m + A_{11}) \dot{V}_X + mZ_G \dot{\omega}_y + (m + A_{33}) V_Z \omega_y - (mX_G - A_{35}) \omega_y^2 = -(m - \nabla \rho) g \sin \theta + F_x \quad (23)$$

$$(m + A_{33}) \dot{V}_Z + (-mX_G + A_{35}) \dot{\omega}_y - (m + A_{11}) V_X \omega_y - mZ_G \omega_y^2 = (m - \nabla \rho) g \cos \theta + F_z \quad (24)$$

$$mZ_G \dot{V}_X + (-mX_G + A_{35}) \dot{V}_Z + (I_{yy} + A_{55}) \dot{\omega}_y + m(Z_G V_Z + X_G V_X) \omega_y - A_{35} V_X \omega_y = -(mZ_G - \nabla \rho Z_B) g \sin \theta - (mX_G - \nabla \rho X_B) g \cos \theta + M_y \quad (25)$$

여기서, A_{11}, A_{33}, A_{35} 는 부가질량, A_{55} 는 부가관성모멘트, I_{yy} 는 y 축에 대한 관성모멘트, θ 는 속도, $\omega_y = \dot{\theta}$ 는 피치 각속도이다.

F_x, F_z, M_y 는 각각 전진방향, 상하방향, 회전방향의 유체외력으로, 이 외력은 AUV의 자세, 전진속도 및 각 운동 성분에 따라 변화하는 시변 비선형 항이다. AUV의 전진속도가 일정하다고 가정하고, 글라이딩형 AUV의 상하방향 운동이 심도 변화에 미치는 영향이 작다고 가정하고, 무게중심

과 부력중심을 $x_B = z_B = x_G = 0, z_G = h_0$ 으로 정하면, AUV의 심도제어를 위한 운동방정식은 다음과 같이 간단한 형태의 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B\eta + f(x) \quad (26)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -U_0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$x = \{\omega_y \ \theta \ z\}^T$$

이며, z 는 수심을 나타내고 $f(x)$ 는 AUV의 비선형항을 포함하는 비선형 항을 나타낸다.

식(26)의 시스템 행렬의 각 계수는 운항조건에 따라 변화되므로, 전진속도를 $U_0 = 6$ 노트로 하고 문헌²⁾의 데이터를 이용하면, $a_1 = 0.7, a_2 = 0.03, b = -0.035$ 이고, G 는 아래 식과 같으며,

$$G = [1 \ 0.75 \ -0.023]$$

슬라이딩 면은 다음과 같이 얻어진다.

$$s(x) = \omega_y + 0.75 \theta - 0.023 z \quad (27)$$

일정한 시간간격으로 해저의 상태정보가 얻어진다면, 식(26)을 이산화하여 본 연구의 방법을 적용할 수 있다. 전방향 시각 소나의 신호처리 시간을 고려하여 샘플시간 간격을 $\Delta t = 5$ 초로 정하면, 이산화를 $\Phi = e^{A\Delta t}, \Gamma = \int_0^{\Delta t} e^{A\tau} d\tau B$ 로 수행하여 이산 시스템에 대한 행렬식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} -0.0191 & -0.0373 & 0 \\ 1.2447 & 0.8522 & 0 \\ -29.5669 & -28.1689 & 1 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} -0.0436 \\ -0.1725 \\ 2.1410 \end{bmatrix}$$

본 연구에서 제안된 방법으로 시뮬레이션을 수행하기 전에, 문헌²⁾의 연속시스템에 대한 슬라이딩 제어를 수행하여 본 연구방법과 비교하고자 한다. 문헌²⁾의 슬라이딩 제어식은 다음 식으로 주어졌다.

$$u = 1.43 \omega_y + 3.14 \theta + k_n \text{sat} \text{sgn}(s)$$

여기서,

$$\text{satsgn}(s) = \begin{cases} +1 & \text{if } s \geq s_0 \\ -1 & \text{if } s \leq -s_0 \\ s/s_0 & \text{if } -s_0 < s < s_0 \end{cases}$$

시스템의 강인성을 검증하기 위하여 설계조건과 다른 전진속도를 갖는 AUV에 대하여 심도제어를 수행하였다²⁾. 이를 위한 모델로는 설계조건과 일치하는 Model I, 속도가 빠른 경우를 Model II, 느린 경우를 Model III로 다음과 같이 정하였다.

$$\begin{aligned} \text{Model I} : \dot{\omega}_y &= -0.7 \omega_y - 0.03 \theta - 0.035 \eta \\ \text{Model II} : \dot{\omega}_y &= -0.7 \omega_y - 0.03 \theta - 0.070 \eta \\ \text{Model III} : \dot{\omega}_y &= -0.7 \omega_y - 0.03 \theta - 0.0175 \eta \end{aligned}$$

Fig. 3은 Δt 가 0.5초인 경우에 대해 연속시스템에 대해 설계된 슬라이딩 모드법을 이용하고, 스위칭 계인과 슬라이딩 면의 경계를 $[k_n, s_0] = [6, 0.4]$ 으로 정한 경우의 제어 결과를 나타낸다. 모델 I, II, III 모두의 경우에 대해 시스템이 목적하는 심도제어가 성공적으로 이루어지는 결과를 보였다.

이러한 강인한 제어 시스템이 샘플간격이 길어지는 경우의 운동응답을 보기 위하여, Δt 가 5초 및 10초인 경우에 대해 각각 Fig. 4, Fig.5에 나타내었다. Fig. 4에서 이미 슬라이딩 모드 제어에 의한 제어응답이 과도응답을 보이며, 채터링을 발생하는 것을 알 수 있고, Fig. 5에서는 제어 시스템이 슬라이딩 특성을 잃어버린 결과를 보인다. 이 현상은 근본적으로 슬라이딩 모드 제어법이 고 주파수의 스위칭 이론에 근거하기 때문에 샘플 간격이 길어지면서 발생하는 현상이다.

이산 시스템 식(1)에 대해 설계된 이산 가변구조 제어 방법 식(10)에 의한 심도제어를 연속시스템의 경우에 선정한 모델 I, II, III에 대하여 수행하였다. 슬라이딩 면은 연속시스템의 슬라이딩 제어 경우와 같은 식(26)을 이용하였다. Fig. 6은 Δt 가 0.5초일 경우에 대하여 $\rho = 0.8$ 로 선정하고, 아래와 같이 이산 스위칭 계인 및 교란 성분을 정하며,

$$F = [0.4, 0.4, 0.1], \quad D = [0.1, 0.1, 0]$$

수평타는 0.4 radian 이상 작동할 수 없다는 조건으로 수행된 심도제어 결과이다.

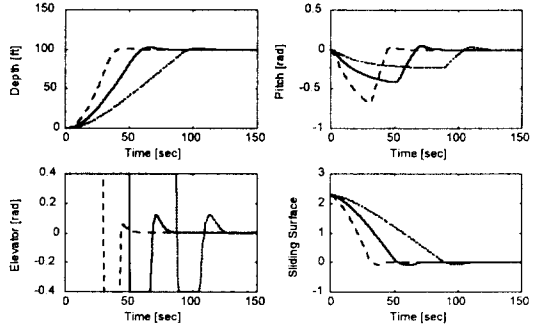


Fig. 3 Dynamic response with continuous sliding mode control : $[k_n, \sigma_0] = [6, 0.4]$, $\Delta t = 0.5$ sec solid : Model I, dash: Model II, dot: Model III

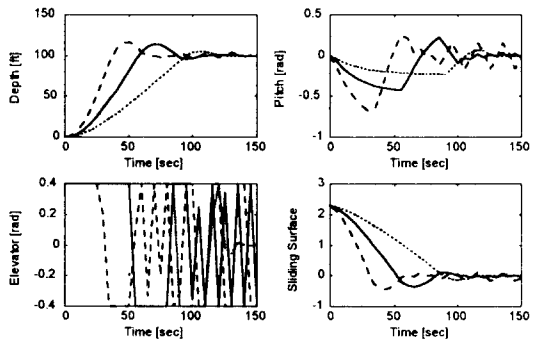


Fig. 4 Dynamic response with continuous sliding mode control : $[k_n, \sigma_0] = [6, 0.4]$, $\Delta t = 5$ sec

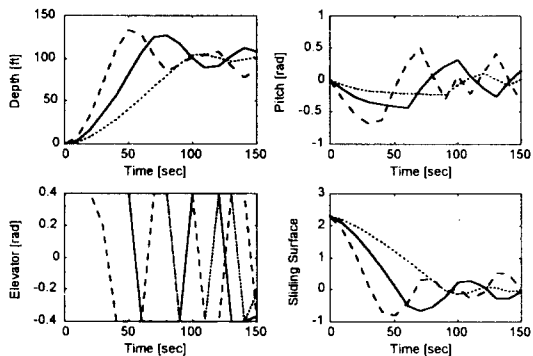


Fig. 5 Dynamic response with continuous sliding mode control : $[k_n, \sigma_0] = [6, 0.4]$, $\Delta t = 10$ sec

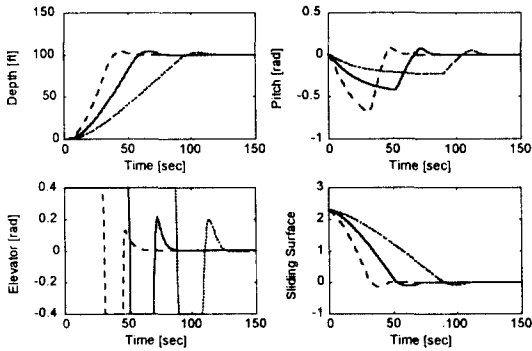


Fig. 6 Dynamic response with discrete sliding mode control : $\Delta t = 0.5\text{sec}$, $\rho = 0.8$
 $F = [0.4, 0.4, 0.1]$, $D = [0.1, 0.1, 0]$

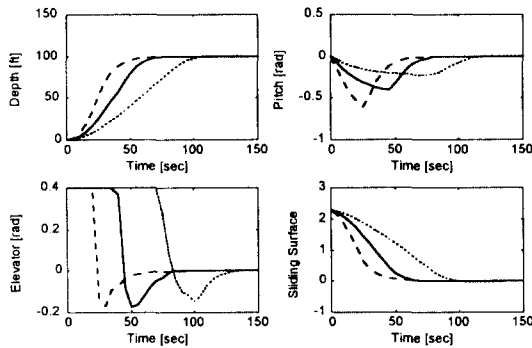


Fig. 7 Dynamic response with discrete sliding mode control : $\Delta t = 5\text{sec}$, $\rho = 0.8$
 $F = [0.4, 0.4, 0.1]$, $D = [0.1, 0.1, 0]$

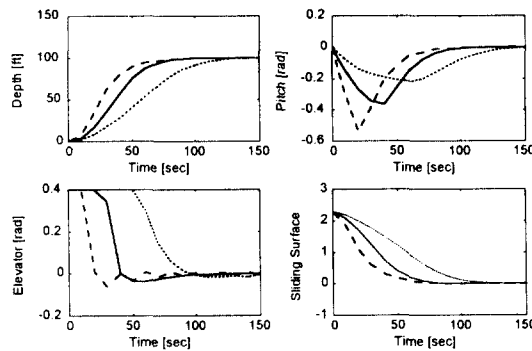


Fig. 8 Dynamic response with discrete sliding mode control : $\Delta t = 10\text{sec}$, $\rho = 0.8$
 $F = [0.4, 0.4, 0.1]$, $D = [0.1, 0.1, 0]$

샘플 시간 간격이 작은 경우의 이산 가변구조제어법에 의한 심도제어 결과는 연속시스템의 슬라이딩 모드 제어법과 유사한 결과를 보여, 본 연구에서 제안한 방법이 기존의 경계요소를 도입한 슬라이딩모드 제어법과 동일한 효과를 보임을 알 수 있다. 본 방법에서 ρ 가 작은 경우에는 시스템의 불확실성이 많은 시스템에 대해 천이역에서 채터링이 발생할 수 있으므로, $0 < \rho < 1$ 의 범위에서 적절히 큰 값을 정하는 것이 좋은 결과를 보였다.

Fig.7 및 Fig.8은 Fig.6의 경우와 동일한 조건에 대하여 Δt 가 각각 5초, 10초인 이산 시스템에 대한 심도제어 결과를 나타낸다. 심도제어 결과는 연속시스템에서 보인 채터링 및 불안정성이 모델 I, II, III에 대하여 공히 보이지 않았으며, Δt 가 10초인 경우의 전진속도가 큰 모델 II에 있어서 천이역에서 약간의 채터링이 발생하는 결과를 보였다. 문헌¹³⁾에서 언급한 바와 같이 본 제어기는 지수함수적으로 수렴하는 특성을 갖고 있어 샘플 시간 간격에 무관하게 이 특성을 보이고 있다. 불확실성에 관련된 D 벡터를 작게 정하는 경우에는 스위칭 계인이 작아지나, 선형제어 영역이 넓어져, 불확실성이 큰 모델 II, III에 대해서는 채터링이 발생하는 결과를 보인다.

Fig.9는 모델 I에 대하여 Δt 가 5초인 경우에 대해 이산시스템의 궤도추적 제어를 수행한 결과를 나타낸다. 궤도추적의 경우에도 심도유지 제어와 동일한 제어성능을 보이고 있다.

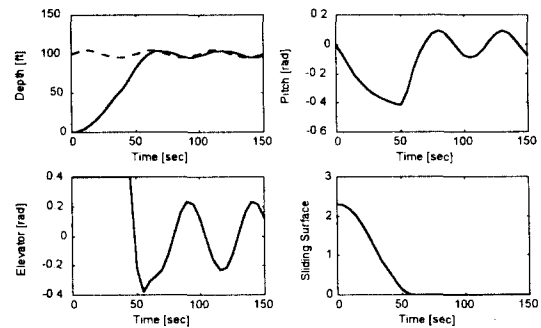


Fig. 9 Tracking control with discrete sliding mode control : $\Delta t = 5\text{sec}$, $\rho = 0.8$
 $F = [0.4, 0.4, 0.1]$, $D = [0.1, 0.1, 0]$

이상의 AUV 심도제어 시뮬레이션 결과로부터, 이산 시스템에 대한 가변구조제어기법을 도입함으로써 샘플시간 간격이 큰 시스템에 대하여 불확실성에 강인한 의사 슬라이딩 모드 제어법의 유효성을 검증하였다. 따라서, 본 연구에서 제안된 제어기법은 샘플시간 간격이 길어져 발생하는 채터링 문제를 갖는 시스템에 효과적인 방법이 될 수 있다.

4. 결언

본 논문에서 불확실성을 갖고 데이터가 불연속으로 얻어지는 이산 시스템에 대하여 가변구조시스템법을 이용한 의사 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 안정하게 제어할 수 있는 제어기를 구현하였다. 기존의 의사 슬라이딩 모드 방법을 일반화시켜서 설계된 절환면에 근접한 상태를 유지하는 제어특성을 갖는 이산 가변구조 제어시스템을 구현하였으며, 이의 안정성을 검증하였다. 본 논문의 방법은 시스템의 불확실성에 대한 스위칭 계인을 독립적으로 선정할 수 있으므로, 시스템의 강인제어기 설계를 위한 인자의 선정에 편리한 이점이 있으며, 과도 스위칭에 의한 과도 응답을 피할 수 있고, 채터링을 감소시키는 효과를 나타낸다. 또한 본 방법은 궤도추적을 위한 제어기로 적용가능하다. 샘플시간 간격이 긴 경우의 AUV 시스템에 대하여 심도제어 시뮬레이션을 수행함으로써 본 연구방법의 유효성을 검증하였고, 이러한 시스템은 해저에서 소나를 이용한 해저지형을 실시간으로 관측하면서 자율항주하는 AUV 또는 수상선에서 실시간으로 제어하는 AUV에 대해 적용가능하다.

후기

본 논문은 과학기술처의 '97년도 기관 고유사업의 일환으로 수행되고 있는 "200m급 탐사용 AUV 개발(IV)" 과제 연구결과의 일부임을 밝힌다.

참고문헌

1) Yoerger, D.R., Slotine, J.-J.E., *Robust trajectory control of underwater vehicles*, IEEE J.

of Ocean Eng. Vol.OE-10, No.4, Oct., 1985
 2) Cristi, R., Papolulias, F.A., Healey, A.J., *Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane*, IEEE J. of Ocean Eng., Vol.15 No.3, July, 1990
 3) Sur, J.N., Seo, Y.T., *Design of experimental evaluation of sliding mode controller for nonlinear autonomous underwater vehicle*, 한국해양공학회지, Vol.6, No.1, pp.11-18, 1992
 4) Slotine, J.-J., Li, W., *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, Inc., 1991
 5) Milosavljevic, C., *General condition for the existence of a quasisliding mode on the switching hyperplane in discrete variable structure systems*, Automatic Remote Control, Vol.46, pp.307-314, 1985
 6) Sarpturk, S.Z., Istefanopulos, Y., Kaynak, O., *On the stability of discrete-time sliding mode control systems*, IEEE Tr. on Automatic Control, Vol.AC-32, No.10, Oct., 1987
 7) Kotta, U., *Comments on the stability of discrete-time sliding mode control systems*, IEEE Tr. on Automatic Control, Vol.34, No.9, Sep., 1989
 8) Furuta, K., *Sliding mode control of a discrete system*, Systems and Control Letters, Vol.14, pp.145-152, 1990
 9) Chan, C.Y., *Servo-systems with discrete-variable structure control*, Systems and Control Letters, Vol.17, pp.321-325, 1991
 10) Sira-Ramirez, H., *Non-linear discrete variable structure systems in quasi-sliding mode*, Int. J. Control, Vol.54, No.5, pp.1171-1187, 1992
 11) Hwang, C.L., *Design of servocontroller via the sliding mode technique*, IEE Proc.-D, Vol.139, No.5, Sep., 1992
 12) Pieper, J.K., Surgenor, B.W., *Discrete sliding mode control of a coupled-derives apparatus*

- with optimal sliding surface and switching gain*, IEE Proc.-D, Vol.140, No.2, Sep., 1993
- 13) Chan C.Y., *Robust discrete quasi-sliding mode tracking controller*, Automatica Vol.31, No.10, pp.1509-1511, 1995
- 14) Misawa, E.A., *Observer based discrete-time sliding mode control with computational time delay*, Proc. of American Control Conference IEEE Tr. on Automatic Control, Seattle, pp.1323-1327, 1995
- 15) Tesfaye, A., Tomizuka, M., *Robust control of discretized continuous systems using the theory of sliding modes*, Int. J. Control, Vol.62, No.1, pp.209-226, 1995
- 16) Hung, J.Y., Gao, W., Hung, J.C., *Variable structure control : a survey*, IEEE Tr. on Industrial Electronics, Vol.40, No.1, pp.2-22, 1993