고속 수중운동체 정밀 유도제어를 위한 항법성능 분석

홍성표¹ · 한용수^{2*}

Performance Analysis of Navigation System for Guidance and Control of High Speed Underwater Vehicle System

Sung-Pyo Hong¹ · Yong-su Han^{2*}

¹ Department of Industrial Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

² M&S R&D Lab, LIG Nex1, Seongnam 463-400, Korea

요 약

유도제어 시스템 체계개발의 초기단계에는 운용 효과도 도출 및 요구사항 적합성 검토를 통한 체계 개략사양도출을 위해 효과도 분석을 수행한다. 본 논문의 목표는 M&S (Modeling & Simulation)를 활용한 운용 효과도 분석을 통해 고속 무인 수중운동체의 목표점 도달 임무를 위한 체계 요구사항 도출이다. 운용 효과도는 대상 수중운동체의 목표점 도달 정확도로 정의한다. 도달 정확도에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 변수는 항법센서 성능이다. 본 논문에서는 관성항법센서(Inertial Navigation Sensor, INS)와 도플러 속도 측정 장치(Doppler Velocity Log, DVL)를 이용한 복합항법을 고려하였다. 몬테카를로 수치 시뮬레이션을 통해 항법센서 성능에 대한 효과도 분석을 수행한다. 몬테카를로 수치 시뮬레이션 결과는 CEP(Circular Error Probability)와 분산을 이용한 확률분석을 통해 분석한다. 상용 항법센서 가격을 고려하여 최적의 가격대 성능비를 갖는 항법센서 성능을 제시한다.

ABSTRACT

To obtain the system requirement specification in the beginning of the precision guidance system development, the effectiveness and reliability analysis for the system are necessary. The main purpose of this research is to obtain the system requirement specification for the high speed unmanned underwater vehicles by carrying out the effectiveness analysis using the modeling and simulation scheme. The effectiveness is position error for target position. Reaching accuracy is expected to be affected by the navigation sensor parameter. Assume that the navigation sensors that consist of inertial navigation system(INS) and doppler velocity log(DVL) is the parameter. To analyze the effectiveness of each parameter, Monte-Carlo numerical simulation is performed in this research. The effectiveness analysis is carried out using circular error probability(CEP) and variance analyze scheme. Considering the cost function, the specification of the navigation sensor is provided. The cost function is consist of the INS and DVL specification and the price of those sensors.

키워드 : 고속 수중운동체, Modeling & Simulation, 효과도 분석, 몬테카를로 시뮬레이션

Key word : High Speed Underwater Vehicle, Modeling & Simulation, Effectiveness Analysis, Monte-Carlo Simulation

접수일자 : 2013. 05. 28 심사완료일자 : 2013. 06. 17 게재확정일자 : 2013. 06. 28

* Corresponding Author Yong-su Han(E-mail:Yongsu.han@lignex1.com, Tel:+82-31-8026-4272)

M&S R&D Lab, LIG Nex1, Seongnam 463-400, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.9.2227>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

유도제어 시스템 체계개발의 초기단계에는 운용 효과도 도출 및 요구사항 적합성 검토를 통한 체계 개략 사양도출을 위해 효과도 분석을 수행한다[1]. 본 논문에서는 M&S(Modeling and Simulation)를 활용하여 대상 고속 무인 수중운동체의 운용 효과도를 도출한다. 운용 효과도를 도출하기 위해서는 대상 운동체를 모사하는 운동, 유도, 그리고 항법모델을 구성해야 하며, 운용개념을 통해 효과도에 영향을 미치는 다양한 변수를 선정해야 한다. 운용 효과도는 대상 고속 무인 수중운동체의 목표점 도달 정확도로 정의한다. 도달 정확도에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 변수는 항법센서 성능이다. 몬테카를로 수치 시뮬레이션을 통해 다양한 항법센서 변수에 대한 효과도 분석을 수행한다.

무인 수중운동체는 수중의 기뢰 탐지 및 제거 혹은 수중 지형 탐색을 위한 임무를 위해 연구되고 있다. 특히, 군사 분야에서는 기뢰 탐지 및 제거를 위한 무인 잠수정이 개발되고 있다. 대표적인 무인 잠수정으로 REMUS와 HUGIN이 있다. REMUS와 HUGIN은 탐색 영역 근처의 모함으로부터 런치(launch)된 후, 지형 탐색 및 기뢰 탐지를 위해 저속(2~4노트)으로 운용된다. HUGIN 3000과 REMUS를 그림 1에서 볼 수 있다.

HUGIN 3000

REMUS

그림 1. 무인 수중운동체
Fig. 1 Unmanned Underwater Vehicle

본 논문에서는 원거리의 기뢰부설 예상지역을 탐색하기 위한 임무를 가정한다. 가정된 임무는 무인 잠수정이 신속한 기뢰 탐지 및 제거를 위해 원거리(5km~)에서 런치된 후, 고속(30kt)으로 예상되는 기뢰부설 지역으로 주행하는 것이다. 원거리의 기뢰를 탐지하기 위해서는 고속으로 주행하여 정확히 기뢰 탐지 시작점에 도달해야 한다. 따라서 본 논문에서는 장거리 목표점 도달 정확도를 운용효과도로 정의하고 몬테카를로 수치

시뮬레이션을 수행하여 효과도 분석을 수행한다.

도달정확도는 x-y축의 2차원 평면에서 목표점과의 거리오차로 정의한다. 정의한 도달 정확도는 정밀 항법 성능에 크게 좌우된다. 수중운동체의 유도제어 알고리즘에서는 현재 상태를 추정한 상태변수를 되먹임 받아 유도제어 입력을 계산하는데, 상태추정에 이용되는 항법센서 성능이 정밀 유도제어 성능에 큰 영향을 미치고, 이는 다시 말해 도달 정확도에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 대상 고속 무인 수중운동체에서 사용하는 항법센서는 INS와 DVL 속도측정 장치이다.

관성항법 장치인 INS는 가속도 센서와 자이로로 구성된다. 가속도 센서에서 측정된 각 축의 가속도와 자이로에서 측정된 각속도를 이용하여 대상 운동체의 속도, 위치, 자세각 등의 상태값을 추정한다[2]. 상태값을 계산하는 알고리즘은 적분과정을 포함하기 때문에, 운용시간이 증가함에 따라 적분오차가 쌓이는 특성을 가지고 있다. 따라서 INS성능이 도달 오차에 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

본 논문에서는 대상 무인 수중운동체의 운용효과도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 INS성능, DVL 성능을 관찰요소로 정의하고 효과도 분석을 수행한다. 효과도 분석은 확률분석 분야에서 널리 사용되는 몬테카를로 수치 시뮬레이션을 이용하여 수행하였다. 몬테카를로 수치 시뮬레이션 결과는 CEP(Circular Error Probability)와 분산을 이용한 확률분석을 통해 분석한다.

본론의 2장에서는 운동, 유도, 복합항법 모델과 관성항법 및 도플러 속도계에 대해 설명한다. 3장에서는 효과도 분석을 위한 몬테카를로 수치 시뮬레이션 수행결과를 설명하고, 마지막으로 4장에서는 결론에 대해 서술한다.

II. 본 론

2.1. 기동 모델

무인 수중운동체의 운동을 모사하기 위해 2차원 질점 모델을 고려하였다. 2차원 질점 모델은 식 (1)~(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = V \sin \psi \quad (1)$$

$$\dot{y} = V \cos \psi \quad (2)$$

여기서, x, y 는 2차원 위치, V 는 속도, ψ 는 heading이다.

그림 2. 2차원 평면에서의 질점모델
Fig. 2 2-Dimensional Point-mass Model

절점의 무인 수중운동체를 원하는 목표점으로 유도하기 위해서 시선각(Line Of Sight, LOS) 유도법칙을 이용하였다[3, 4]. 그림 3은 첫 번째 경로점 waypoint, WP)에서 두 번째 경로점으로 유도하는 시선각 유도법칙을 나타낸 것이다. 무인운동체와 두 번째 경로점을 잇는 직선과 항법 좌표계의 x 축 사이의 각을 ψ_{los} 로 정의한다. 무인운동체가 두 번째 경로점에 도달하기 위해서는 수중운동체의 heading ψ_{UVV} 이 ψ_{los} 이 되도록 제어해야 한다. heading 각 제어를 위한 제어오차는 없다고 가정한다.

그림 3. 시선각 유도법칙
Fig. 3 Guidance Law based on Line of Sight

2.2. 항법 모델

대상 수중운동체의 항법시스템은 자이로스코프와 가속도계로 구성된 관성항법장치와 DVL으로 구성된다. DVL은 도플러 효과를 이용한 속도측정 장치로 복합항법 알고리즘에서 속도를 보정한다. 복합항법 시스템은 가속도계를 이용하여 동체좌표계 기준의 속도를 계산하고, DVL에서 측정된 지면속도로 보정한다. 속도 추정 및 보정은 칼만필터를 이용하여 수행한다. 그림 4

는 일반적인 수중운동체의 항법시스템 구성도이다[5]. DVL은 속도보정, 자력계는 방향보정, 심도계는 심도보정, 그리고 GPS(Global Positioning System)은 위치보정을 한다. 본 논문에서는 심도를 고려하지 않은 2차원 운동만을 고려하고, 방향보정은 하지 않는다고 가정한다. 또한, 수면 부상이 필요한 GPS 위치보정도 사용하지 않는다고 가정한다. 즉, 대상 수중운동체는 자이로스코프, 가속도계와 DVL만을 사용한다.

그림 4. 항법시스템 구성도
Fig. 4 Navigation System Block Diagram

2.3. 항법센서

원하는 목표점에 정확히 도달하기 위해서는 무엇보다 정확한 상태값을 추정할 수 있는 관성항법장치가 필수로 요구된다. 관성항법장치는 자기의 위치 및 자세를 얻어내기 위해 사용되며, 자이로와 가속도계로 구성된다. 측정된 각속도와 가속도는 적분 알고리즘과 자세변환을 통해 자세, 속도 및 위치를 계산한다. 관성항법장치를 이용한 위치 계산에서 오차요인으로는 정렬오차, 척도인자(scale factor) 오차, 바이어스 오차 등이 있다. 이러한 오차와 적분 방식의 항법 알고리즘으로 인해 시간이 지날수록 항법오차가 크게 증가한다.

관성항법장치는 제작 방식에 따라 다양한 종류가 있는데, RLG(Ring Laser Gyro), FOG(Fiber Optic Gyro), MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 관성센서가 대표적이다. 본 논문에서는 수치 시뮬레이션을 위해 허니웰사의 RLG 방식의 HG1700 와 노스롭그루만사의 FOG 방식의 LN-251 관성센서 사양을 고려하였다.

그림 5. 관성항법센서 (a) HG-17000 (b) LN-251
Fig. 5 Inertial Navigation Sensor (a) HG-17000 (b) LN-251

DVL은 음향신호의 도플러 원리를 이용하여 속도를 측정하는 보조항법센서로서 관성항법센서의 오차를 보정하는 기능을 한다. DVL 보조항법센서는 현재 위치를 기준으로 일정 시간 간격후의 이동을 직선으로 가정하고, 진행방향, 속도, 그리고 자세를 계산한다. 본 논문에서는 수치 시뮬레이션을 위해 LinkQuest社의 NavQuest 600과 600P DVL 사양을 고려하였다.

그림 6. NavQuest 600 DVL
Fig. 6 NavQuest 600 DVL

III. 수치 시뮬레이션

분석모델은 MATLAB을 이용하여 모델화 하였고, 수치 시뮬레이션을 위한 시간간격은 0.01초이다. 본 논문의 연구목표인 고속 수중운동체의 목표점 도달을 위한 효과도 분석에서 가장 중요한 요인은 항법센서 성능이다. 수중운동체는 지상운동체나 비행체와 다르게 GPS (Global Positioning System)을 이용한 항법에 제한을 가지기 때문에, 보조 항법센서로써 심도 및 속도센서를 이용한 복합항법을 이용한다. 본 논문에서는 각 두 가지 수준의 INS와 DVL 속도센서 성능을 고려하였다. 고려한 센서사양은 표1, 2와 같다. 몬테카를로 수치 시뮬레

이션은 각 변수마다 100회 수행하여 통계분석을 하였다. 몬테카를로 수치 시뮬레이션 결과는 CEP(Circular Error Probability, 50%), 분산(1σ)과 2σ 범위까지 살펴 보았다. 샘플이 정규분포라고 할 때 분산(1σ)은 평균을 기준으로 전체샘플의 68%, 2σ 은 95%을 차지한다.

원거리 고속 무인 수중운동체를 이용한 목표점 도달 정확도 분석을 위해서, 30노트로 10km 직진주행을 가정하였다. 또한, 상용 항법센서의 가격과 거리오차로 나타난 항법성능을 고려하여 최적의 가격대 성능비를 갖는 항법센서 성능을 제시하였다.

표 1. 관성항법센서 성능[6, 7]

Table. 1 INS classes

INS 레벨	레벨 1(LN-251)		레벨 2(HG-1700)	
센서	가속도계	자이로	가속도계	자이로
update rate	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz
잡음	0.1e-3g	$0.125\text{rad}/\sqrt{\text{hr}}$	0.1e-3g	$0.125\text{rad}/\sqrt{\text{hr}}$
배울오차	500ppm	150ppm	500ppm	150ppm
바이어스	0.5mg	$0.1^\circ/\text{hr}$	1mg	$0.1^\circ/\text{hr}$

표 2. DVL 속도계 성능

Table. 2 Doppler Velocity Log accuracy

DVL 레벨	update rate	성능 (배울오차)	잡음	바이어스
레벨 1	2Hz	0.2%	0.0099%	0.001%
레벨 2	2Hz	1.0%	0.0144%	0.002%

복합항법에 의한 성능분석

복합항법 성능에 따른 운용효과도 분석을 위해서 표 1, 2와 같이 각각 두 가지 수준의 INS와 DVL 센서를 이용하였다. 총 4가지 조합에 대해 각 100회의 몬테카를로 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 모두 동일한 거리를 주행하며, DVL은 주행 전구간에서 사용하였다. 그림 7에서 볼 수 있듯이, 0.1deg/hr 성능의 INS와 0.2% 성능의 DVL 센서를 이용하였을 경우 가장 정확하게 목표점에 도달하였으며, 1.0deg/hr 성능의 INS와 1.0% 성능의 DVL 속도센서를 이용하였을 경우에 목표점 도달 오차가 가장 큰 것을 볼 수 있다.

그림 7. 복합항법센서에 따른 성능분석

Fig. 7 Performance Comparison of the Composite Navigation system

동일한 수준의 INS를 이용하였을 경우, DVL에 의해 정확도가 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 동일한 수준의 DVL을 이용하였을 경우, INS 수준이 달라져도 오차 차이는 크지 않은 것으로 볼 수 있다. 따라서 정밀한 유도 제어를 위해서는 INS 성능보다 DVL 성능이 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그림 8과 표 3은 복합항법 성능에 따른 오차범위의 결과이다.

표 3. 관성항법센서 성능

Table. 3 Performance of the Composite Navigation systems

INS	0.1 deg/hr		1.0	
	0.2 %	1.0	0.2	1.0
CEP(50%)	19.27(m)	67.60	29.97	72.47
σ (65%)	24.96	75.17	33.47	78.74
2σ (95%)	36.86	99.44	47.45	100.78

그림 8. 복합항법센서 수준에 따른 오차범위

Fig. 8 Error Bounds of the Composite Navigation system

분산(1σ)과 2σ 도 CEP와 같은 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다. 수치 시뮬레이션에서 고려한 상용 항법센서의 가격과 수치 결과를 통해 얻은 목표점 도달 정확도를 성능요소로 하여 가격에 대한 성능비율을 살펴본다. 성능비율은 몬테카를로 수치 시뮬레이션 결과인 CEP를 이용하였고, 가장 정확도가 높은 0.1deg/hr INS, 0.2% DVL 경우의 CEP를 기준으로 하였으며, CEP 결과의 역수를 기준 값으로 나눈 값을 성능비율로 하였다. 본 논문에서 고려한 INS의 경우에 0.1deg/hr급은 1억여 원, 1.0deg/hr급은 3천여만원, DVL의 경우에 0.2% 급은 3천여만원, 1.0% 급은 1.5천여만원이다.

그림 9는 가격에 대한 성능비율을 도시한 것이다. 0.1deg/hr INS를 사용할 경우에 1.0deg/hr INS일 때 보다 DVL 성능이 높아지면, 복합항법성능 상승율이 크다. 0.1deg/hr INS - 0.2% DVL을 사용하면 1.0% DVL - 0.2% DVL을 사용할 때에 비하여 복합항법 성능이 50% 가량 향상되는 것을 볼 수 있다. 0.1deg/hr INS - 0.2% DVL 복합항법의 경우 1.0deg/hr INS - 0.2% DVL 복합항법에 비해 가격은 2배 이상이지만 성능은 2배만큼 향상되지 않는다. 결국, 가격과 성능을 고려한다면 본 논문에서 고려한 4가지 경우 중에서 1.0deg/hr INS - 0.2% DVL의 복합항법이 가장 좋은 조합이라고 할 수 있다.

그림 9. 복합항법센서의 가격 vs. 성능 비교

Fig. 9 Price-Performance Comparison of the Composite Navigation System

IV. 결 론

본 논문에서는 고속 수중운동체의 목표점 도달임무에 대한 운용효과도 분석을 위해 수중운동체의 운동, 유도, 그리고 항법모델을 설계하였고, 운용효과도에

영향을 미칠 것으로 예상되는 관성센서와 DVL 성능을 변수로 정의하고 몬테카를로 수치 시뮬레이션 수행하였다. 복합항법센서를 이용할 경우에 INS 성능에 비해 DVL 성능이 목표점 도달 정확도에 큰 영향을 준다는 결과를 얻었다. 또한, 가격과 성능비율을 고려할 경우에 상대적으로 낮은 성능의 INS와 높은 성능의 DVL을 사용하는 것이 좋다는 결과를 얻었다.

본 논문의 수치 시뮬레이션에서는 운용 전 구간에서 DVL 센서를 사용한다고 가정하였지만, 실제 운용환경에서는 전 구간 사용이 제한될 수 있다. 따라서 DVL 운용구간에 따른 운용효과도를 분석해야 한다. 또한, 실제 해저지형 정보를 활용한 분석이 필요하다.

REFERENCES

- [1] M. Anders, "A Homing Torpedo the Effect of the Tactical Situation and the Torpedo Parameters on the Torpedo Effectiveness," Master's thesis, Naval Postgraduate school, Monterey, CA, 1977.
- [2] G. Yanrui, M. Ricardo, and S. Joao, "Accuracy Analysis of DVL/IMU/Magnetometer Integrated Navigation System using Different IMUs in AUV," *IEEE International Conference on Control and Automation*, Xiamen, China, June 9-11, pp. 516-521, 2010.
- [3] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Vehicles - Guidance Systems*, Lecture Note, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2013.
- [4] P. Encarnacao, A. Pascoal, M. Arcak, "Path Following Control of Marine Vehicles," *Proceedings of Control 2000-4th Portuguese Conference on Automatic Control*, Guimaraes, Portugal, October, pp. 31-36, 2000.
- [5] J. Bjorn, G. Kenneth, S. Kristian, "dvl velocity aiding in the hugin 1000 integrated inertial navigation system," *Modeling, Identification and Control*, vol. 24, no. 4, pp. 223-235, 2004.
- [6] Data sheet for the HG1700 Inertial Measurement Unit. Honeywell Inc..
- [7] Data sheet for the NavQuest 600 - Doppler Velocity Log (DVL). LinkQuest Inc..

홍성표(Sung-Pyo Hong)

1986. 3. 해군사관학교 조선공학과 공학사
1996. 12. 국방대학교 무기체계학과 국방과학석사
2013. 현재, 한남대학교 산업공학과 박사과정
2011~현재, 방위사업청 유도무기사업부
※관심분야 : Modeling and Simulation, 무기체계 연구개발/획득, NCW

한용수(Yong-Su Han)

2004.2. 세종대학교 항공공학과 공학학사
2006.2. 서울대학교 항공공학과 공학석사
2012.2. 서울대학교 항공공학과 공학박사
2012~현재, LG넥스원(주) 선임연구원.
※관심분야 : Modeling and Simulation