

이동로봇을 이용한 자원탐사 축소모형 실험 시스템 구축 응용

유선철¹ · 정현기^{2*} · 윤중선¹ · 표주현¹ · 조성호² · 오동문¹ · 강동중¹

¹부산대학교 공과대학 기계공학부
²한국지질자원연구원 자원탐사개발연구실

Mobile Robot Based Down-Scaled Mineral Resources Exploration Test System

Son-Cheol Yu¹, Hyun-Key Jung^{2*}, Joong-Sun Yoon¹, Ju-Hyun Pyo¹,
Sung-Ho Cho², Dong-Moon Oh¹, and Dong-Joung Kang¹

¹School of Mechanical Engineering, Pusan National University

²Exploration Geophysics and Mining Engineering Dept., Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea

요 약: USN (Ubiquitous Sensor Network, 유비쿼터스 무선네트워크) 융합기술을 기반으로 하는 자원탐사 축소모형 시스템을 구축하였다. 실제 환경의 재현을 위해, 비금속 모형판 아래 금속판을 설치하고, 모형판 위에서 이동로봇에 설치된 고정밀 3축 자기센서를 이용하여 실제 자장값을 계측한다. 측정된 자장값은 무선네트워크를 이용하여 이동로봇이 중앙 컴퓨터로 전송한다. 이러한 하드웨어 기반의 테스트 시스템은 현장 상황을 물리적으로 유사하게 재현함으로써, 시뮬레이션의 신뢰도가 높고, USN기반 자원탐사시스템 설계지침을 다각도로 검토할 수 있다. 본 연구에서는 금속물체 탐지시스템을 재현하기 위해, 평판 위에서 이동로봇을 사용하여, 평판 아래에 설치된 금속판의 위치를 탐지하는 실험을 성공적으로 실시하였다.

주요어: USN, 물리탐사, 탐사설계지침, 이동로봇, 축소모형, 자동화

Abstract: This paper presents mobile robot based down-scale mineral resources exploration test system for the USN (Ubiquitous Sensor Network) based exploration. The system emulates the actual exploration environment. Underneath the metal free test plate, a metal object is attached. A magneto-meter mounted mobile robot runs around on the plate to find the metal. The measured magneto-meter values are transferred to the host PC via wireless network. The system enables to improve the reliability of simulation as well as to help efficient exploration system design. Metal-detecting experiments were carried out to illustrate the efficiency of the proposed system.

Key words: USN (Ubiquitous Sensor Network), Geophysical Exploration, System Design, Mobile robot, Scaled model, Automation

서 론

자원가격의 급등으로 자원개발 경쟁이 세계적으로 가속화되고 있는 가운데 자원의 대부분을 수입에 의존하는 현 상황에서 자원 확보를 위한 자원탐사에 많은 기술 개발이 필요하다. 또한 대부분의 자원탐사는 매장자원에 대한 최소한의 정보를 바탕으로 광범위한 지역에 대한 탐사를 통해 자원매장이 예상되는 지역을 좁혀간 후 실제 발굴을 통해 확인을 하는 과정이 필수적이다. 자원개발에 있어 경쟁력을 갖추기 위해서는 시간과 비용의 소모가 많은 광범위한 영역의 탐사에 대한 기술적

우위가 필요한 상황이다. 이러한 상황 속에서 단시간에 광범위한 영역의 효과적인 탐사가 가능한 USN (Ubiquitous Sensor Network) 융합기술을 기반으로 한 자원 탐사 시스템이 각광을 받고 있다. 우리나라는 USN기반 탐사의 필수인 IT 관련 인프라가 세계 최고수준으로, 상대적으로 다른 나라에 비해 매우 큰 기술적 우위를 지닐 수 있다. USN기반 탐사시스템은 다양한 환경 하에서 동시에 여러 에이전트로부터 자료를 수집하고 통합 관리하는 시스템으로, 단순한 일반 탐사 시스템보다 훨씬 더 복잡하고 많은 상황에서 이동경로를 최적화하며, 험지나 심해와 같은 위험한 환경에서 발생할 수 있는 사고를 미연에 방지해야 한다. 이를 위해 실제로 시스템을 운용해 보는 과정이 필수적이다. 그러나 실제 현장에서의 테스트는 매우 어렵고, 수치적인 시뮬레이터로는 신뢰성의 한계 등의 문제가 있다.

이를 위해 이동로봇에 고정밀 3축 자기센서를 장착하여 실

2009년 11월 6일 접수; 2009년 11월 18일 채택

*Corresponding author

E-mail: hkjung@kigam.re.kr

Address: 92 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

계의 탐사환경을 재현한 자원탐사 축소모형 실험시스템을 제안한다. 본 시스템은 수치적 시뮬레이터의 문제점을 극복하고 USN기반 탐사시스템을 구축할 수 있다.

자원탐사를 위한 이러한 연구는 매우 유용한 방법으로 생각되나, 국내외에서 지금까지 거의 보고된 적이 없다.

축소모형 실험 시스템

자원탐사 방법은 지하에 매장된 금속자원을 고정밀 3축 자기센서로 탐지하는 상황을 상정하여, 금속판으로 고정밀 3축 자기센서로 발견하는 축소모형실험 시스템을 구축하였다. 금속을 바닥에 설치해 놓고, 고정밀 3축 자기센서가 부착된 로봇이 금속 주변을 이동하면서 2차원 자장지도를 생성한다 (Blakely, 1996; Stanley, 1977; Merrill 외, 1983).

시스템 설명

Fig. 1과 Fig. 2는 구축된 축소모형 시스템을 보여주고 있다.

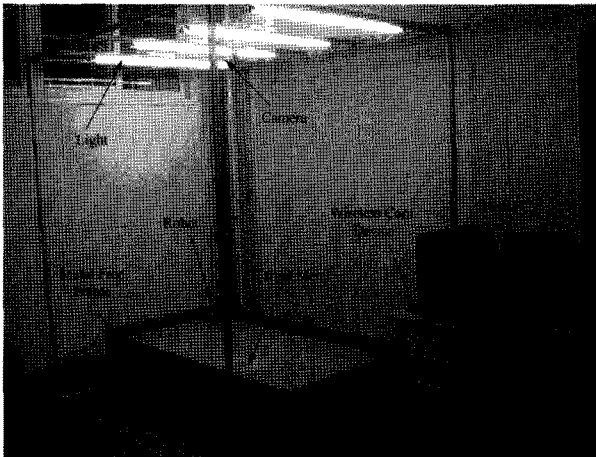


Fig. 1. Scene of Down-Scaled Mineral Resources Exploration Test System.

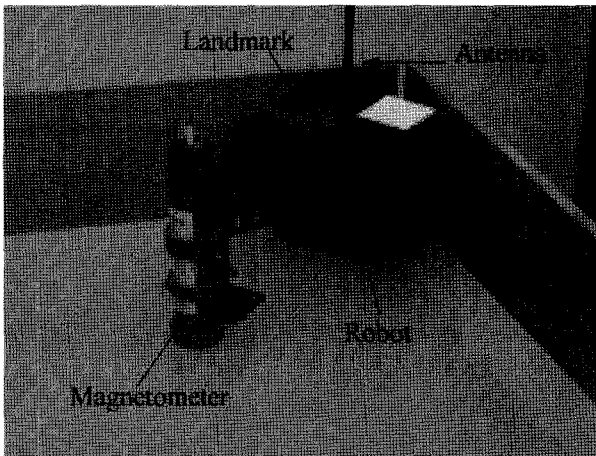


Fig. 2. Magnetometer Attached Mobile Robot.

저자들은 자원탐사의 하드웨어 시스템의 실험이 가능한 시스템을 제안하였다(유선철 외, 2009a). Fig. 1과 같이 목재타자 및 아크릴로 구성된 모형판 위에서 Fig. 2와 같이 3차원 고정밀 3축 자기센서를 부착한 이동로봇이 자장값을 계측한다. 이동로봇의 본체가 자기센서에 미치는 자기장영향을 최소화하기 위해, 본체로부터 센서를 20 cm 이격시켰다. 로봇이 없을 경우의 자기센서의 자장값(M_x , M_y , M_z)을 5회 측정된 평균값과 로봇에 부착한 경우의 값은 실험에 선정된 로봇자체가 최대한 자성 물질을 최소화 한 것이었기 때문에 그 차이는 미미하였다. 그러나 로봇과 센서가 일체로 움직일 때, 로봇 본체의 자장의 영향은 일정하게 작용하므로 상기의 측정된 값을 이용하여 자장의 영향을 보정하였다. 반복측정 결과로 볼 때 재현성이 우수하였다.

금속판은 아크릴판 아래에 설치하여, 지하에 매장된 것과 같은 역할을 한다. 목재타자는 플라스틱못으로 제작된 100% 비금속프레임이다. 로봇은 Host PC에서 무선으로 제어된다. Fig. 3은 축소모형 시스템의 구성도를 보여주고 있다. 로봇은 자장값을 Host PC로 무선으로 송신하고, PC는 로봇으로 위치 이동에 필요한 명령을 송신한다. 로봇의 위치는 축소모형 시스템의 천장에 부착된 카메라로부터 전송받은 값을 Host PC가 계측한다. 축소모형 시스템은 GPS를 사용하지 않는 실내에서 사용하므로, 카메라에 의한 위치파악 시스템을 구축하였다.

GUI에 대한 설명

Fig. 4는 시스템운용 GUI이다. 천장 카메라로 로봇의 위치와 금속의 위치 파악이 가능하며, 화상에서 탐색을 원하는 위

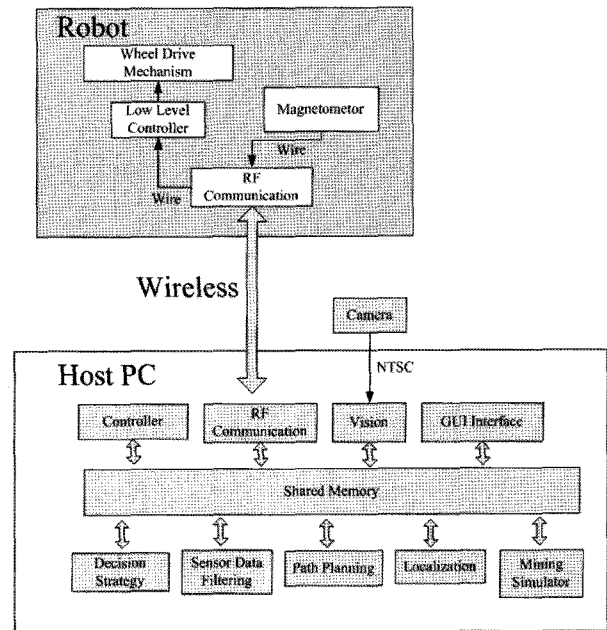


Fig. 3. Organization of Down-Scaled Mineral Resources Exploration Test System.

치를 지정하면 'X' 표시가 화면에 오버레이 되고, 로봇은 'X' 라고 표시된 위치로 이동하며 자장 자료를 수집하여 무선통신을 통해 PC로 보낼 수 있다.

이동로봇 제어 수식

일반적인 이동로봇의 성능 및 이동 알고리즘(Ota 외, 2001)을 고려할 때, 자원탐사용 축소모형의 이동에는 직선 주행과 회전이 바람직하다. 곡선경로를 이용할 경우, 센서의 회전성분 오차가 커지기 때문이다. 이 때문에, 직선 주行的 제어 정밀도를 높일 필요가 있다.

이동로봇의 구동장치로는 자동차처럼 차륜의 조향각을 조정하는 스티어링형(Steering Type)과 탱크와 같이 양차륜의 회전수를 조정하는 독립구동형이 있다. 본 연구는 이동로봇의 제어가 쉽고 소형화에 유리한 독립구동형을 채택하였다. Fig. 5와 같은 독립구동형 이동로봇의 전진속도를 v , 각속도 ω , 차륜반경을 R_w , 좌측차륜의 각속도를 ω_l , 우측차륜의 각속도를 ω_r , 차륜간 간격을 T , 로봇의 회전반경을 R 이라고 할 때, 이동로봇의 전진속도 v 와 회전 각속도 ω 는 아래와 같은 식으로 구해진다.

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R_w}{2} & \frac{R_w}{2} \\ \frac{R_w}{T} & -\frac{R_w}{T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_l \\ \omega_r \end{pmatrix} \quad (1)$$

독립구동 차륜형 이동로봇이 Fig. 6에서, X축을 목표직선으로 직진한다고 할 때, 로봇의 모델링식은 다음과 같다. 로봇의 각속도를 ω , 감쇠(damping)계수를 k_ω , 로봇이 목표직선과 이루는 각도를 θ , 각도에 비례하는 계수를 k_θ , 로봇과 직선과의 거리를 D , 직선과 이루는 거리의 계수를 k_η 라고할 때, 로봇이 목표직선을 따라가기 위한 회전각속도 미분 목표치 $(d\omega/dt)^{ref}$ 는 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^{ref} = -k_\omega - k_\theta\theta - k_\eta D \quad (2)$$

이 경우 계수들이 만족해야할 조건은 아래의 식의 근의 모든 계수의 근의 실수부가 음의 부호이어야 한다.

$$S^3 + k_\omega S^2 + k_\theta S + v k_\eta = 0 \quad (3)$$

임의의 직선경로를 추종해 가기위하여, 임의의 시간 t에서의 미소변위 시간 Δt 에 이동로봇의 회전각속도 목표치는 아래의 식

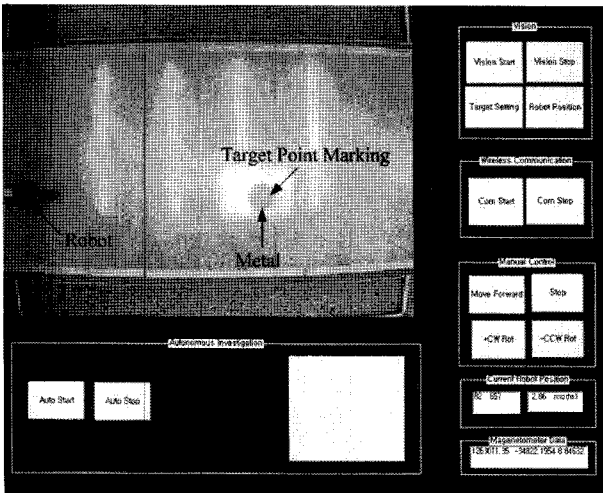


Fig. 4. GUI (Graphic User Interface) of Down-Scaled Mineral Resources Exploration Test System.

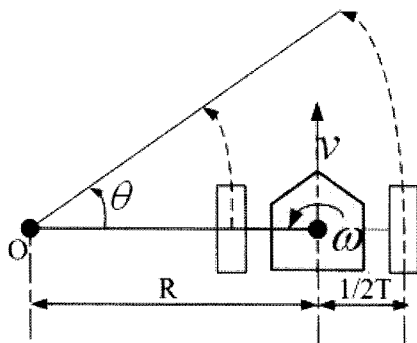


Fig. 5. Wheel control of Independent Wheel Type Robot.

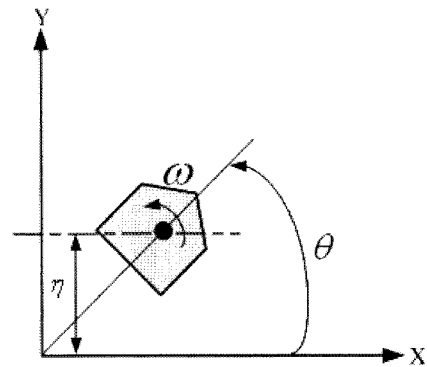


Fig. 6. Moving Control of Mobile Robot.

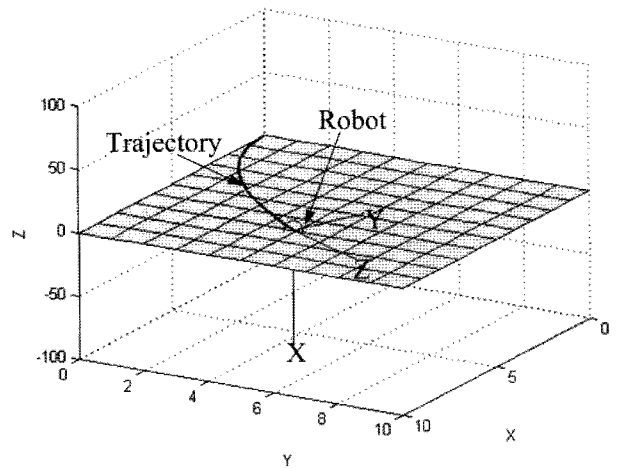


Fig. 7. Down-Scaled Exploration Test System Simulator.

과 같다.

$$(\omega(t + \Delta t))^{ref} = \omega(t) - (k_w \omega + k_\theta \theta - k_\eta \eta) \Delta t \quad (4)$$

이때 각차륜의 목표 회전각속도는 아래의 행렬식으로부터 구해낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \omega_r^{ref} \\ \omega_l^{ref} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_w} & \frac{T}{2R_w} \\ \frac{1}{R_w} & -\frac{T}{2R_w} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v^{ref} \\ \omega^{ref} \end{pmatrix} \quad (5)$$

로봇의 주행시의 속도제어를 위해 가감속과 정속주행을 하기 위한 토크는 다음과 같이 구해질 수 있다. 차륜의 토크를 τ , 기어를 통한 감속기의 가속비를 γ , 감속기의 전달효율을 η , 차륜의 마찰저항을 $f_w(v)$, 기어의 감속기 저항을 $f_g(v)$, 이동로봇의 질량을 M , 차륜의 질량을 m , 로봇의 가속도를 α 라고 할 때, 로봇의 가속도는 아래의 식으로 구해진다.

$$\frac{2\eta\gamma\tau}{R_w} - (f_w(v) + f_g(v)) = (M + 2m)\alpha \quad (6)$$

상기의 식에 따라 이동로봇의 속도를 제어 한다.

시뮬레이터

Fig. 7은 축소모형 시스템의 개발을 위한 시뮬레이터를 보여 주고 있다. 시뮬레이션과 축소모형의 실험값을 이용하여 자장의 모델링 등 다양한 업그레이드가 가능하다.

금속 탐지 실험

USN기반 이동로봇을 이용한 축소 탐사실험을 다음과 같이 실험하였다.

Fig. 8과 같이 금속판을 이동로봇의 고정밀 3축 자기센서의 전방위치의 플라스틱판 아래 설치하고 이동로봇이 전진해 나가면서 자장 센서의 값을 획득, 저장한다. 고정밀 3축 자기센서의 좌표계는 Fig. 6과 같은 오른손좌표계이며, Fig. 9와 같이 금속판을, 0, 30, 45, 60, 90도로 Tilt된 목재프레임위에 고정시키고, 실시간 자장 탐지 실험을 실시하였다. 아크릴판 아래에 설치된 금속판과 고정밀 3축 자기센서의 거리는 약 1.5 cm이

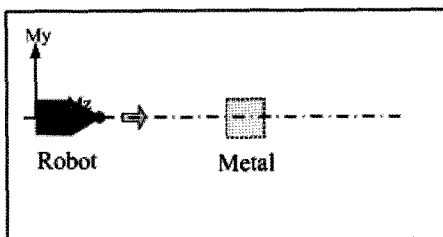


Fig. 8. Real Time Data Collector.

다. 로봇은 0 ~ 100 cm의 직선구간을 전진하며, 금속판의 중심은 로봇이동의 중심선상의 50 cm 상에 위치한다.

Fig. 10에서 Fig. 17까지는 실험결과를 나타낸다. 3차원 고정밀 3축 자기센서의 자장값은 3축의 Mx, My, Mz와 H (Horizontal), T (Total), 온도를 나타낸다. Fig. 10과 Fig. 11은 금속판이 없는 경우이며, Fig. 12~17은 금속판이 있는 경우의 0 ~ 100 cm 구간 자장값을 나타낸다. 실험 결과 그래프를 보면

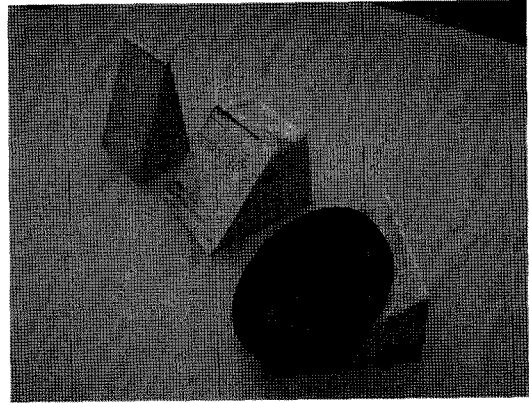


Fig. 9. Tilted Wood Frame for Mounting Metal.

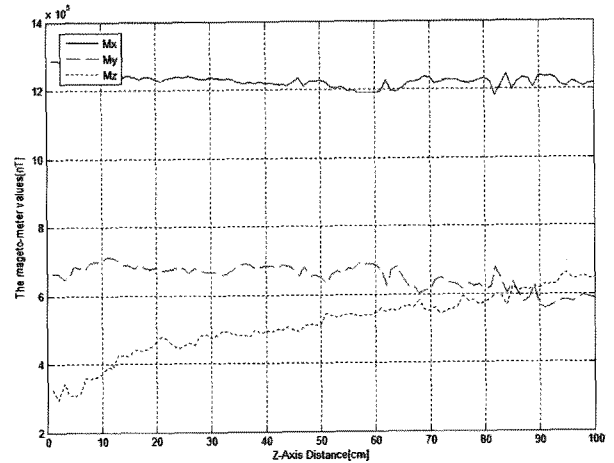


Fig. 10. No metal, Magnetometer (Mx, My, Mz).

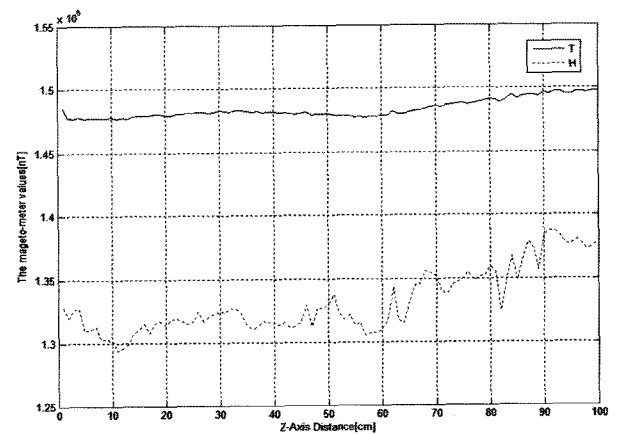


Fig. 11. No metal, Magnetometer (H, T).

금속판이 있는 경우는 없는 경우에 비해 피크등의 확연한 특징이 나타난다. 또한 금속판이 있는 경우, 금속판이 위치한 중앙부인 50 cm 지점에서 자장의 최대값 또는 변곡점 발생 등과 같은 자장값의 급격한 변화를 나타내고 있다. 따라서 자장의 변화 실시간 탐지실험에서 금속판을 올바르게 탐지하고 있음

을 나타내고 있다.

시스템 구축의 관점에서 최초 실험으로 실험결과는 만족스러웠으며, 보다 다양한 모형 위치에 대한 변화탐지 및 지하자원의 분석 알고리즘 역산 등은 보다 전문적인 연구영역으로, 향후의 연구 개발과제이다.

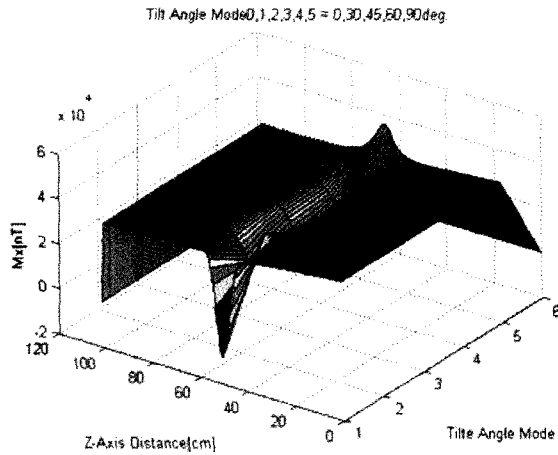


Fig. 12. Sensing Data Using Magnetometer, M_x (x-axis).

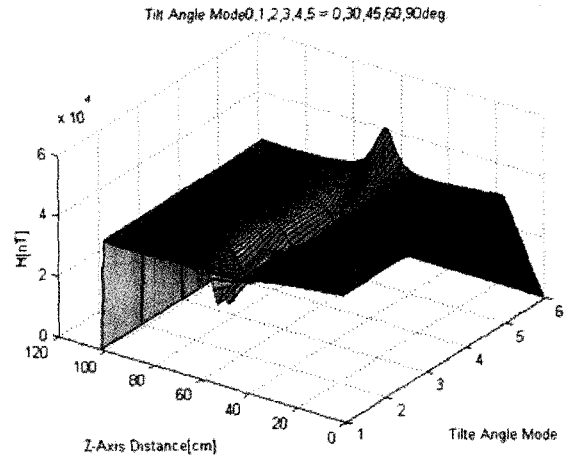


Fig. 15. Sensing Data Using Magnetometer, H (Horizontal).

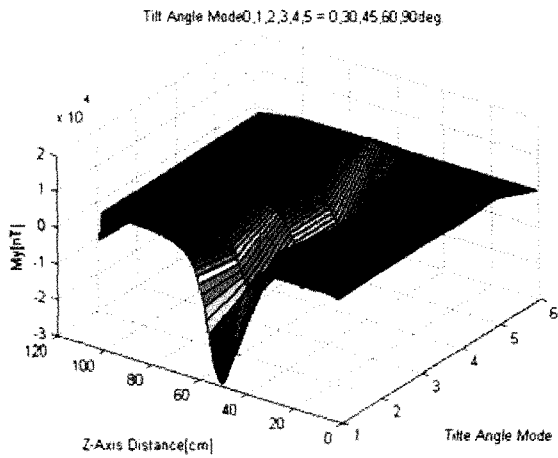


Fig. 13. Sensing Data Using Magnetometer, M_y (y-axis).

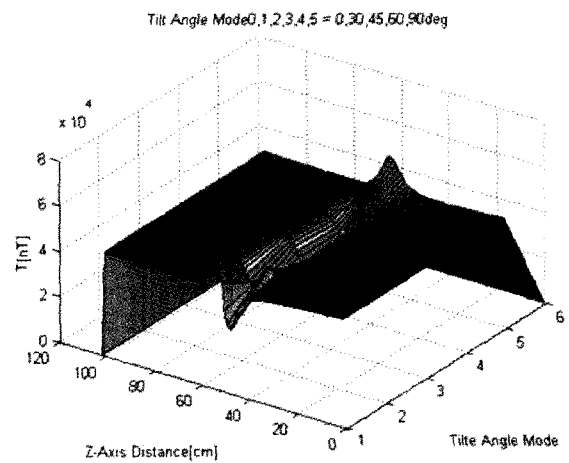


Fig. 16. Sensing Data Using Magnetometer, T (Total).

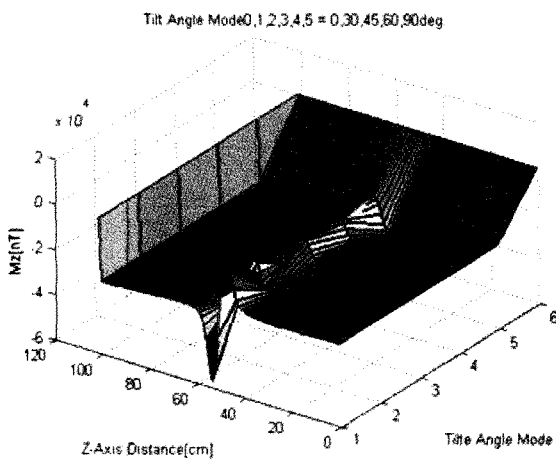


Fig. 14. Sensing Data Using Magnetometer, M_z (z-axis).

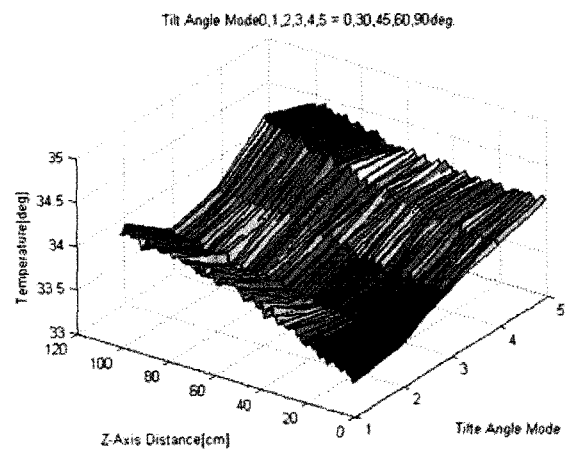


Fig. 17. Sensing Data Using Magnetometer, Temperature.

결 론

본 연구는 USN기반 탐사에 필요한 각종 요소의 통합 및 설계지침 획득에 필요한 축소모형 시스템을 제안하고 유용성을 확인하였다.

이동로봇을 이용한 이러한 자원탐사 축소모형 시스템은 측정의 재현성이 우수하므로, 자료 수집이나 분석 실험에 효과적으로 이용될 수 있다.

본 연구는 인접분야간의 융합을 상호 시도 구축하는 최초의 연구시스템 구조로서, 하드웨어 제어 계층에 주력하였다. 따라서 정밀한 보정 및 추가적인 실험연구는 향후 과제로 설정하였다. 본 시스템은 계층 시뮬레이션에 주력하는 것이 소기의 목적이며, 시스템 결과와 일반적 탐사와 결과의 비교는 향후의 추가적 연구로 규명할 필요가 있다.

현재, 실제 지형과 유사한 자원탐사 축소모형을 구축하여, 시스템을 고도화하여 이동로봇이 험지에서 탐사를 할 수 있는 방법을 모색 중이다. 그리고 장착용 탐측 Gradient 센서의 실시간 정보제공용 인터페이스를 개발하였으며, 계층정밀도를 높이기 위하여 고정밀 3축 자기센서의 정교한 Calibration에 대한 연구가 수행 중이다.

이동로봇을 이용한 탐사 자동화 시스템은 향후 탐사임무 자동화에 활용될 수 있다. 인력에 의한 탐사가 거의 불가능한 해양자원 탐사의 경우, 수중로봇을 이용한 탐사 자동화의 연구가 활발히 진행되고 있으며(유선철 외, 2009b; Ura 외, 2004; Yu 외, 2004), 육상의 자원탐사 같은 경우 다수의 이동로봇을 적극 도입하면 로봇 상호간의 협력을 통한 다양한 탐사 자동화가 기대된다.

사 사

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 한국지질자원연구원의 국정과제인 “USN 기반 융합자원탐사 시스템개발”의 위탁연구과제의 일환으로 수행된 연구이며, 원고의 미흡한 점들을 지적해주신 심사위원님들 및 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- Blakely, R. J., 1996, Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications, *Cambridge University Press*.
- Stanley, J. M., 1977, Simplified magnetic interpretation of the geologic contact and thin dyke, *Geophysics*, **99**, 1236-1240.
- Merril, R. T., McElhinny, M. W., and McFadden, Ph. L., 1983, The magnetic Field of the Earth, *Academic Press*.
- 유선철, 정현기, 표주현, 윤중선, 2009a, 하드웨어축소 모형시스템을 이용한 자원탐사 시뮬레이션 시스템구축, 2009년 춘계지질과학기술 공동학술대회 논문집, 185-186.
- Ota, J., Kurbayashi, D., and Arai, T., 2001, Introduction to Intelligent Robot; solution of path planning problems, *Corona publishing*. (in Japanese)
- 유선철, 정현기, 표주현, 윤중선, 2009b, 자원탐사 시스템 구축을 위한 자동화 방법모색, 2009년 춘계지질과학기술 공동학술대회 논문집, 455-456.
- Ura., T., et al., 2004, Introduction to an AUV “r2D4” and its Kuroshima Knoll Survey Mission, *Proc. of MTS/IEEE Oceans*.
- Yu, S. and Ura, T., 2004, A system of Multi-AUV Interlinked with a Smart Cable for Autonomous Inspection of Underwater Structures, *International Journal of Offshore Structures and Polar Engineering*, **14**(4), 265-273.