

저가격 관성 센서를 이용한 펜 형 입력 장치의 개발

Design of a pen-shaped input device using the low-cost inertial measurement units

장욱* · 강경호* · 최은석* · 방원철* · Alexy Potanin* · 김동윤*

Wook Chang*, Kang Kyoung Ho*, Eun-Seok Choi*, Won-Chul Bang*, Alexy Potanin* and Dong-Yoon Kim*

* 삼성종합기술원 Ubiquitous computing LAB.

· Ubiquitous computing LAB.

Samsung Advanced Institute of Technology

요 약

본 논문에서는 사용자가 2차원 또는 3차원 상에서 필기를 하는 경우의 관성치를 측정할 수 있는 가속도계와 각속도계를 장착한 펜형 입력 장치를 소개한다. 각속도계의 측정치를 한 번 적분해 시스템의 자세를 구하며 이는 가속도에 포함되어 있는 중력 가속도 성분을 제거하는 데 사용된다. 시스템의 위치는 보정된 가속도를 두 번 적분해 구한다. 이러한 원리는 관성 항법 시스템에서 보편적으로 사용되는 것이다. 그러나 필기 궤적을 복원하기 위해 사용되는 이중 적분 과정으로 인해 위치 측정치의 정확도는 시간이 지남에 따라 심각하게 떨어진다. 이러한 문제는 관성 항법 시스템에 있어 일반적인 경우이며 통상 외부의 기준 신호나 기타 정보를 이용한 주기적 또는 비주기적인 시스템의 교정을 통해 해결된다. 본 논문에서는 위치 및 속도의 보정은 온라인과 오프라인 교정 과정을 통해 이루어진다. 온라인 교정 과정에서는 칼만 필터를 이용한 보상 필터 기법을 사용한다. 오프라인 교정 과정에서는 최종적인 시스템의 항법 오차의 상수 성분을 속도 정보와 움직임 검지 알고리즘을 통해 제거한다. 실제 실험을 통해 제안된 시스템의 유용성과 효용성을 보인다.

Abstract

In this paper, we present a pen-shaped input device equipped with accelerometers and gyroscopes that measure inertial movements when a user writes on 2 or 3 dimensional space with the pen. The measurements from gyroscope are integrated once to find the attitude of the system and are used to compensate gravitational effect in the accelerations. Further, the compensated accelerations are integrated twice to yield the position of the system, whose basic concept stems from the field of inertial navigation. However, the accuracy of the position measurement significantly deteriorates with time due to the integrations involved in recovering the handwriting trajectory. This problem is common in the inertial navigation system and is usually solved by the periodic or aperiodic calibration of the system with external reference sources or other information in the field of inertial navigation. In the presented paper, the calibration of the position or velocity is performed on-line and off-line. In the on-line calibration stage, the complementary filter technique is used, where a Kalman filter plays an important role. In the off-line calibration stage, the constant component of the resultant navigational error of the system is removed using the velocity information and motion detection algorithm. The effectiveness and feasibility of the presented system is shown through the experimental results.

Key words : Wearable computer, ubiquitous computing, inertial navigation, input device, pen computing

1. 서 론

최근의 개인용 모바일 기기들의 시장과 서비스는 다양하고 광범위하게 확대되고 있으며 이들 기기에 적합한 새로운 형태의 입력 장치의 개발 또한 요구되고 있다. 휴대 기기용 입력 장치들은 그 특성상 휴대성 및 입력의 용이성이 요구된다.

이를 위해서는 일반 평면이나 3차원 공간에서 문자, 도형, 제스처 입력 등의 자연스러운 입력이 가능한 장치가 필요하다. 앞서 언급한 필요 조건을 만족하는 이상적인 펜 형태의 입력 장치는 컴퓨터에 익숙하지 않은 일반인들도 손쉽게 사용 가능한 입력 장치로 기능할 수 있다.

개인 휴대용 단말기 또는 컴퓨터 응용 기기에 사용되는 펜형 입력 장치는 대체로 LCD 태블릿(tablet)이나 디지털 태블릿(digitizer tablet) 등과 같은 2차원 센서 배열을 이용하는 방식을 취하고 있다. 이러한 입력 장치는 비교적 큰 면적의 감지 평면이 필요하므로 휴대하기가 불편하고 소정의 공간을 차지하게 되며, 또한 가격 면에서도 고가인 단점이

접수일자 : 2003년 2월 19일

완료일자 : 2003년 4월 2일

있다. 기술적인 추세로 볼 때, 개인 휴대용 단말기는 점차 소형화되어 손목시계 형태나 지갑 형태의 휴대용 단말기로 변화하는 추세이며 이에 따라 그 표시 화면도 줄어들기 때문에 기존 방법에 의한 입력은 더욱 어렵게 된다.

현재 상용화 되었거나 연구 개발 중인 펜 형태의 입력 장치들은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 펜 외부에서 펜 선단의 좌표를 측정하는 방식이고 두 번째는 펜 내부에서 펜 선단의 운동을 측정하는 방식이다.

펜 외부에서 펜 선단의 좌표를 측정하는 방식으로 3축 측정방식 [1], 전자과 [2] 또는 초음파 [3]를 이용하는 방식, 초음파와 가속도 센서를 융합한 방식 [4] 등이 있다. 그러나 상기 방식들은 펜에서 발신 신호를 보내고 외부에서 수신하는 형태를 지니기 때문에 휴대가 불편한 단점이 있다.

한편, 펜 내부에서 펜 선단의 좌표를 측정하는 내장 방식은 펜 선단에 장착된 불의 회전을 이용하는 방식 [5], 펜에 작용하는 힘을 측정하는 방식 [6-7]이 있으나, 펜이 지면에서 떨어지게 되면 펜의 운동을 측정하기 어려운 단점이 있다. 그리고 펜 내부에 장착된 2축 또는 3축 가속도 센서를 이용하여 이중 적분을 통하여 전자펜의 위치 운동을 구하는 방식 [8-10]이 제안되었으나, 가속도 센서를 펜 선단에 장착하기 어려운 문제점이 있어, 일정한 높이에 장착할 경우에는 펜 중심축의 기울기에 대한 영향을 고려하지 않은 관계로 큰 위치 오차를 초래할 수 있는 문제점이 있다. 또한, 가속도 신호를 이중 적분 함으로써 누적 오차가 증가되므로 정확한 운동을 측정하기 어려운 단점이 있다. 이러한 펜의 경사각에 대한 영향을 보정하기 위하여 A.T Cross사 [11]에서 2축 이상의 가속도 센서 소자를 펜 선단으로 이동시키고 신호처리부는 펜의 상부로 이동하는 방법을 제안하고 있으나 센서 소자 및 신호처리부가 분리되어 있어 전기적인 잡음의 영향이 크고, 펜 선단에 잉크를 장착할 수 없는 문제점이 있다. 한편, 세이코 (Seiko) 사 [12]에서는 경사각 보정을 위하여 2축 가속도와 2축 Gyro를 이용하여 가속도는 이중 적분으로 그 위치를 구하고, 펜의 각속도를 적분하여 펜의 경사각을 측정하는 방식을 제안하고 있다. 또한, 리코 (Ricoh) 사 [13-14]와 Miyagawa [17]는 펜 내부에 3축 가속도 센서와 3축 Gyro 센서를 내장하여 일반적인 3차원 필기 운동을 하는 펜 끝의 위치를 구하는 방법을 제시하고 있으나 펜 선단이 아닌 센서의 장착 위치를 기준으로 해 필기 궤적을 복원하므로 정확한 입력이 어려운 문제가 있다. 그 외, 칼만 필터 기법을 이용해 가속도 센서의 노이즈를 제거한 후 이중 적분을 통해 필기 궤적을 복원하는 방법이 제시되었으나 시스템의 기울기에 대한 고려를 하지 않음으로 실용적인 대안이 아니다 [15-16]. 이러한 문제점으로 인해 가속도를 사용하는 시스템들은 대체로 서명 인식 [18-22]에 사용되거나, 포인팅 또는 head tracker에 사용되고 있으며 [22-25] 사용자의 입력을 그대로 복원하는 디지털 잉크와 같은 응용 분야에는 거의 사용되지 않는 실정이다.

앞서 언급한 시스템 중 가속도 정보와 같은 관성 측정치를 이용해 사용자의 필기 궤적을 복원하는 시스템은 군사 및 항법 분야에서 널리 사용되는 관성 항법 시스템 (INS; Inertial Navigation System)의 이론을 차용하고 있다. INS는 관성 측정치를 이용해 3차원 공간상에서 운동하는 물체의 위치, 속도, 자세 등과 같은 항법 정보를 계산하는 시스템으로 이론적으로 스트랩다운 INS (Strapdown INS; SDINS)의 경우 3축 가속도와 3축 각속도만으로 필요한 정보를 얻을 수 있다. SDINS는 각속도 측정치의 적분치를 이용해 시스템의 자세를 계산하고 이에 의해 가속도를 보정하며 보정된 가

속도를 한 번 적분하여 속도, 두 번 적분하여 위치 정보를 계산한다. 그러나 관성 항법을 적용하는 경우 가속도의 이중 적분과 각속도의 적분을 통하여 위치 및 각도를 구하는데, 센서 신호의 잡음이나 드리프트에 의해 가속도계의 경우는 시간의 제곱, 각속도계의 경우에는 시간에 비례하는 형태로 누적 오차가 증가하게 되어 정밀한 3차원 운동을 추정하기가 곤란하다. 통상 이러한 문제를 해결하기 위해서 기존의 SDINS는 추가적으로 GPS와 같은 기준 신호를 제공하는 센서를 장착해 주기적 또는 비주기적으로 오차를 보정한다. 그러나 펜 형 입력 장치의 경우 크기, 연산량, 가격 등의 제한으로 인해 기존 관성 항법 분야에서 사용한 오차 보정 방법론을 직접적으로 적용하는 것은 매우 어려운 일로서, 펜 형 입력 시스템에 관한 기존 연구 결과 중 SDINS를 사용하는 사례 [13-14, 17]는 매우 드물다.

이러한 문제점에도 불구하고 SDINS를 이용하는 입력 장치는 특별한 외부의 추가 센서 또는 필기 평면이 필요 없고 자기장의 변화 등과 같은 외부 환경 변화에 영향을 받지 않는다는 점에서 모바일 기기의 새로운 입력 장치로 가치가 크다. 특히, 3차원 공간상에서의 입력을 부가적인 장비 없이 수행할 수 있는 시스템은 SDINS를 채용한 시스템 이외에는 전무하다 할 수 있어 본 논문에서는 소형 시스템이라는 제약에도 불구하고 외부 추가 센서 없이 사용자의 3차원 입력을 정확히 복원할 수 있는 펜 형 입력 장치를 개발한다. 개발하고자 하는 입력 장치는 저가격 상용 관성 센서를 사용해 3축 가속도와 3축 각속도의 6 자유도 관성 값을 측정하며 적용되는 궤적 복원 알고리즘은 실제 구현 시의 하드웨어에 부가되는 연산량을 감안하여 저성능의 하드웨어에서도 구현 가능하도록 하였다. 이를 위해 사용자의 입력 궤적 오차의 보정은 온라인 과정과 오프라인 과정을 통해 이루어진다. 기존의 유사 연구 결과들 [13-14, 17]과 달리 센서에서 측정된 가속도 값을 펜 선단의 가속도 값으로 변환하고 온라인 보정 과정에서는 칼만 필터 기법을 이용한 보상 필터 기법을 사용하여 정확한 펜 시스템의 자세를 추정하도록 하여 전체 시스템의 성능을 향상시켰다. 오프라인 교정 과정에서는 시스템이 계산한 위치 정보의 오차를 상수로 모델링한 후 속도 정보와 움직임 검지 정보를 이용해 보정을 하여 추가적인 성능 향상을 얻었다. 마지막으로 개발된 시스템을 실제 사용자의 입력 궤적 복원에 적용하여 그 유용성 및 사용성의 개선 효과를 제시한다. 개발된 시스템은 단일 글자의 복원뿐만 아니라 연속된 글자로 이루어진 단어의 복원도 가능하며 이는 현재까지의 특허 및 논문을 포괄한 관련 분야의 연구 결과 중 가장 진보된 결과라 할 수 있다.

2. 시스템 구성

개발된 프로토타입 펜 시스템의 전체 구조를 그림 1에 보인다. 펜 시스템은 두개의 2축 가속도 센서와 3개의 1축 각속도 센서를 장착하여 4축 가속도와 3축 각속도를 측정할 수 있다. 3차원 상에서의 움직임을 측정하기 위해서는 3축 가속도와 3축 각속도로 충분하므로 장착된 시스템에서 측정되는 4축 가속도 중 3축 가속도만을 사용하게 된다. 사용된 가속도 센서는 Kionix사의 KX120-L20 2축 가속도 센서로 MEMS 기술을 적용한 소형의 우수한 잡음비와 온도 특성을 갖는 센서이다 [30]. 펜 시스템에 실장 시 한 개의 가속도 센서는 측정 축과 펜의 중심축이 정렬되도록 하고 다른 하나는 중심축과 수직이 되도록 장착하여 3축 가속도를 측정할 수

있도록 한다. KX120-L20의 가속도 측정 범위는 $\pm 2g$, 감도는 $1000mV/g$ 이며 중력 가속도가 0인 경우 2.5 V의 아날로그 출력을 내보낸다. 각속도 센서로는 Murata사의 1축 각속도 센서 ENV-05F-03을 사용하였다. ENV-05F-03의 최대 측정 범위는 $\pm 60 \text{ deg/s}$ 이고 감도는 $25mV/\text{deg/s}$ 이며 각속도가 0인 경우 2.5 V의 출력을 내보낸다 [31]. 펜 시스템에 실장 시 3개의 각속도 센서는 측정 축이 서로 직교하도록 하여 3축 각속도를 측정한다. 가속도 센서와 각속도 센서 공통으로 출력으로는 아날로그 신호를 사용하며 출력된 센서 신호는 National Instruments 사의 DAQPad-6020E를 통해 PC로 전송해 처리한다.

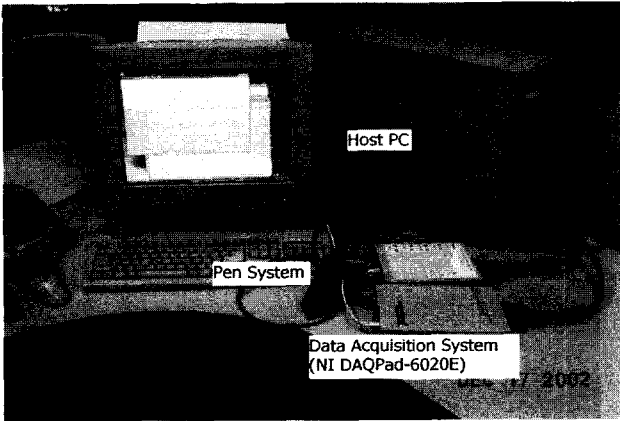


그림 1. 전체 시스템 구성
Fig. 1 Overall system structure

3. 궤적 복원

A. 관성 항법

본 논문에서 제시하는 시스템은 관성 측정치만을 이용해 사용자의 필기 궤적 복원을 수행한다. 관성 측정치를 이용해 이동하는 물체의 3차원 상에서의 위치를 알아내는 기법은 관성 항법으로 분류가 되며 항법 분야에서 널리 사용되고 있다 [26]. INS는 크게 두 가지 종류로 나뉜다. 첫 번째는 메카나이즈드 플랫폼 (Mechanized platform) 기법이며 이는 기계적인 장치를 이용해 플랫폼의 자세 변화에 상관 없이 INS와 항법 좌표계의 각 축을 정렬하는 것이다. 메카나이즈드 플랫폼 기법의 경우 정확도가 우수하나 기계적인 장치가 포함됨으로써 대형이며 고가격을 유지하고 있다. SDINS는 이러한 기계적인 장비 없이 동체에 장착된 가속도 센서와 각속도 센서로부터 얻어진 측정치로부터 위치, 속도, 자세 등과 같은 항법 해를 계산하는 시스템이다. SDINS의 경우 소형 경량이며 최근 발전되고 있는 MEMS 기술이 도입되어 저가격의 신뢰성 높은 시스템을 구축할 수 있는 장점이 있으므로 본 논문에서는 SDINS 기법을 이용한 시스템의 구축을 한다. 두 기법 모두 관성 측정치를 포함한 미분 방정식을 이용해 위치, 속도, 자세와 같은 항법 해를 구한다. 즉, 각속도의 적분치를 이용해 물체의 자세를 계산하여 이를 이용해 장착된 가속도 센서로부터 검출되는 동체 가속도를 가상의 절대 좌표계에서 본 가속도로 변환한다. 절대 좌표계로 변환된 가속도는 적분 과정을 통해 속도와 위치를 계산하게 된다.

그림 2는 3차원 공간에서 자유 운동을 하는 펜 형 입력 장치의 동체 좌표계와 절대 좌표계의 관계를 도시한 것이다.

가속도계와 각속도계는 입력 장치의 동체에 장착되어 동체 좌표계의 3축에서 측정되는 가속도와 각속도를 측정한다. 본문에서 절대 좌표계의 Z축은 중력 방향과 정렬되어 지표면을 향하고 X-Y 평면은 중력 방향에 수직인 좌표계로 설정한다.

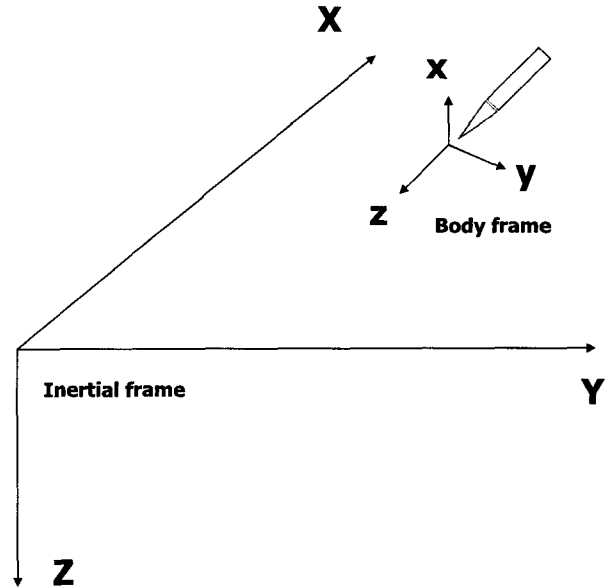


그림 2. 펜 좌표계 (동체 좌표계)와 절대 좌표계
Fig. 2 Pen frame (body frame) and inertial frame

3차원 공간상에서 절대 좌표계에 대한 펜 시스템의 상대 위치를 파악하기 위해서는 시스템의 자세를 계산하고 이로부터 동체 좌표계에서 측정된 가속도 측정치를 절대 좌표계에서 본 값으로 변환하여야 한다. 3차원 공간 상에서의 물체의 자세는 오일러 각 (롤, 피치, 요)으로 표현되며 이들과 각속도의 관계는 다음의 비선형 미분 방정식에 의해 주어진다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{bx} \\ \omega_{by} \\ \omega_{bz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 롤, θ 는 피치, ψ 는 요 각으로 이들을 이용해 동체 좌표계의 x, y, z 축을 중심으로 한 순차적인 회전 변환을 수행하여 절대 좌표계와 동체 좌표계의 관계를 구할 수 있으며 $\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz}$ 는 각각 동체 좌표계의 x, y, z 축을 따라 장착되어 있는 가속도 센서의 출력이다.

펜 시스템에 장착된 가속도계로부터 측정된 값 $A_b = [A_{bx} \ A_{by} \ A_{bz}]^T$ 를 절대 좌표계에서 본 가속도 값으로 변환하는 과정은 식 (2)를 통해 이루어진다.

$$A_n = C_b^n A_b - G \quad (2)$$

여기서 n 은 절대 좌표계, b 는 동체 좌표계를 의미하고, $A_n = [A_{nx} \ A_{ny} \ A_{nz}]^T$ 는 절대 좌표계에서 본 가속도 벡터, $G = [0 \ 0 \ g]^T$ 는 절대 좌표계에서 본 중력 가속도 벡터, $g = 9.8m/s^2$ 이며 방향 코사인 행렬 C_b^n 은 다음과 같다.

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \theta + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}$$

식 (1)과 식 (2)로부터 3차원 공간 상에서 움직이는 펜 시스템의 운동 방정식은 식 (3)의 비선형 상태 변수 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_n &= V_n \\ \dot{V}_n &= C_b^a A_b - G \\ \dot{\phi} &= \omega_{bx} + (\omega_{by} \sin \phi + \omega_{bz} \cos \phi) \tan \theta \\ \dot{\theta} &= \omega_{by} \cos \phi - \omega_{bz} \sin \phi \\ \dot{\psi} &= \frac{\omega_{by} \sin \phi + \omega_{bz} \cos \phi}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $P_n = [P_{nx} \ P_{ny} \ P_{nz}]^T$ 는 절대 좌표계에서 본 펜 시스템의 위치이며 $V_n = [V_{nx} \ V_{ny} \ V_{nz}]^T$ 는 속도 벡터이다. 식 (3)은 항법 방정식으로 불리며 이를 이용해 가속도 측정치 A_b 와 각속도 측정치 $\omega_b = (\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz})$ 로부터 펜 시스템의 위치, 속도, 자세를 계산할 수 있다.

B. 가속도 센서 측정치의 변환

식 (3)의 항법 방정식은 모든 가속도 측정치가 하나의 지점에서 측정되는 것을 가정하고 있다. 그러나 실제 시스템에서는 가속도 센서에서 측정된 동체 가속도를 가상의 지점에서 측정된 동체 가속도로 변환하는 과정이 필요하다. 그림 3은 본 논문에서 제안하는 펜 시스템의 센서 배치도이다.

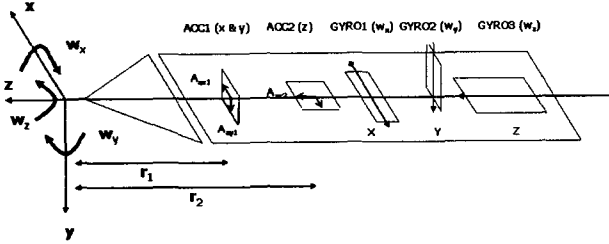


그림 3. 센서 배치도
Fig. 3 Sensor configuration

그림에서 $r_1 = [0 \ 0 \ -r_1]^T$, $r_2 = [0 \ 0 \ -r_2]^T$, $r_1 = 44.4(mm)$, $r_2 = 63.3(mm)$ 이다. 본 논문에서는 펜 끝을 동체 좌표계의 원점으로 설정하였으며 z축은 펜의 중심축과 일치한다. 변환 과정을 설명하기 위해 먼저 그림 4에 도시된 두 좌표계를 가정하자.

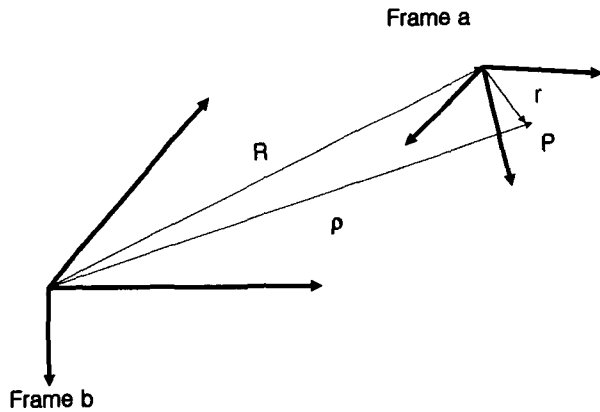


그림 4. 두 좌표계
Fig 4 Two coordinate systems

그림 4에서 P 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho^b = R^b + C_a^b r^a \quad (4)$$

여기서 ρ 는 b 좌표계의 원점으로부터 P 까지의 벡터, R 은 b 좌표계의 원점으로부터 a 좌표계의 원점까지의 벡터, r 은 a 좌표계의 원점으로부터 P 까지의 벡터를 의미하며 C_a^b 는 방향 코사인 행렬, 첨자 a 와 b 는 각각 a 좌표계와 b 좌표계를 의미한다.

식 (4)를 일차 미분하면 식 (5)를 얻고 이를 다시 미분하면 식 (6)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{v}_\rho^b &= \frac{d\rho^b}{dt} = \frac{dR^b}{dt} + \left(\frac{d}{dt} C_a^b\right) r^a + C_a^b \frac{dr^a}{dt} \\ &= v_R^b + C_a^b \Omega_{ba}^a r^a + C_a^b v_r^a \\ &= v_R^b + C_a^b (\Omega_{ba}^a r^a + v_r^a) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\dot{C}_a^b = C_a^b \Omega_{ba}^a$, $\Omega_{ba}^a = \omega_{ba}^a \times$ 의 관계식을 이용했으며 ω_{ba}^a 는 a 좌표계에서 본 b 좌표계에 대한 a 좌표계의 회전 각속도이고 v_R^b 는 b 좌표계에서 본 점 P 의 속도, v_r^b 는 b 좌표계에서 본 a 좌표계의 원점의 속도이다.

$$\begin{aligned} a_\rho^b &= \frac{d^2 \rho^b}{dt^2} = \frac{dv_R^b}{dt} + \left(\frac{d}{dt} C_a^b\right) [\Omega_{ba}^a r^a + v_r^a] \\ &\quad + C_a^b \left[\Omega_{ba}^a v_r^a + \dot{\Omega}_{ba}^a r^a + \frac{dv_r^a}{dt} \right] \\ &= \frac{dv_R^b}{dt} + C_a^b \Omega_{ba}^a [\Omega_{ba}^a r^a + v_r^a + \Omega_{ba}^a v_r^a + \dot{\Omega}_{ba}^a r^a + \frac{dv_r^a}{dt}] \\ &= a_R^b + C_a^b [2\Omega_{ba}^a v_r^a + \Omega_{ba}^a \Omega_{ba}^a r^a + \dot{\Omega}_{ba}^a r^a + a_r^a] \\ a_\rho^b &= C_a^b [a_R^a + 2\Omega_{ba}^a v_r^a + \Omega_{ba}^a \Omega_{ba}^a r^a + \dot{\Omega}_{ba}^a r^a + a_r^a] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, a_r^a 는 a 좌표계에서 본 r 의 가속도이다. 식 (6)에 $C_a^b = I$, $v_r^a = 0$, $a_r^a = 0$, $a_\rho^b = A_a$, $A_a = [A_{ax1} \ A_{ay1} \ A_{az2}]^T$ 는 그림 3의 가속도 센서 ACC1과 ACC2로부터 얻을 수 있는 3축 가속도 측정치, $a_R^a = A_b$ 는 펜 선단의 가속도로 두면 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$A_b = A_a - \Omega_{ba}^a \Omega_{ba}^a r - \dot{\Omega}_{ba}^a r \quad (7)$$

여기서, r 은 펜 선단을 원점으로 하는 동체 좌표계에서 본 가속도 센서의 위치이다. 식 (7)을 이용해 본 논문에서 사용되는 시스템에 대하여 가속도 센서 ACC1과 ACC2에서 측정되는 가속도를 펜 선단의 가속도로 변환하는 식은 식 (8)로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} A_{bx} \\ A_{by} \\ A_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ax1} + (\omega_{bx} \omega_{bz} - \dot{\omega}_{by}) r_1 \\ A_{ay1} + (\omega_{by} \omega_{bz} + \dot{\omega}_{bx}) r_1 \\ A_{az2} - (\omega_{bx}^2 + \omega_{by}^2) r_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 A_{ax1} 과 A_{ay1} 은 그림 3의 가속도 센서 ACC1의 측정치, A_{az2} 는 가속도 센서 ACC2의 측정치, ω_{bx} , ω_{by} , ω_{bz} 는 GYRO1, GYRO2, GYRO3로부터 얻어지는 각속도 센서 측정치, $r_1 = 44.4mm$, $r_2 = 63.0mm$ 이다.

C. 시스템의 초기 자세 계산

본 논문의 시스템은 SDINS 이론을 이용해 사용자의 필기

계적을 계산하여 통상의 SDINS와 같이 정지 시 초기 자세 각의 계산은 성능에 매우 큰 영향을 미친다. 초기 자세를 계산하는 방법으로는 주파수 필터를 이용하는 방법과 칼만 필터를 이용하는 방법이 있으며 본 논문에서는 칼만 필터를 이용하여 초기 자세 계산을 수행한다. 칼만 필터링 기법은 GPS, 속도계 등과 같은 추가 센서를 장착해 SDINS의 오차를 보정하기 위한 기법의 일환으로 사용되어 왔으며 크게 칼만 필터와 SDINS가 융합되어 항법 해에 관련된 전체 상태 변수를 추정하는 기법 (직접 필터링 기법; direct filtering) 과 칼만 필터가 SDINS의 오차만을 추정하는 기법 (보완 필터링 기법; complementary filtering) 이 있다 [26-28]. 직접 필터링 기법의 경우 계산량이 많으며 칼만 필터의 오동작에 의해 전체 시스템 성능이 영향을 받는 문제가 있으므로 대부분의 SDINS에 관한 연구에서는 보완 필터링 기법이 많이 사용되고 있으며 본 논문에서도 해당 기법을 사용해 초기 자세 계산을 수행한다.

칼만 필터링 기법을 이용하기 위해서는 먼저 시스템의 프로세스 모델과 측정 모델을 구해야 한다. 본 논문에서는 프로세스 모델에 사용될 상태 변수로 절대 좌표계에서 본 속도 V_{mx}, V_{my}, V_{mz} 와 오일러 각 ϕ, θ, ψ 를 사용한다. 해당 상태 변수에 대한 시스템 동력학 방정식은 식 (3)의 항법 방정식으로부터 얻을 수 있다. 동력학 방정식과 측정 방정식은 식 (9)와 (10)에 보인다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= C_b^r A_b - G \\ \dot{\phi} &= \omega_{bx} + (\omega_{by} \sin \phi + \omega_{bz} \cos \phi) \tan \theta \\ \dot{\theta} &= \omega_{by} \cos \phi - \omega_{bz} \sin \phi \\ \dot{\psi} &= \frac{\omega_{by} \sin \phi + \omega_{bz} \cos \phi}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (9)$$

모델링 오차를 가정해 가상의 공정 잡음 w 를 추가하여 식 (9)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{x} = f(x, u) + w \quad (10)$$

여기서 $x = [P_n \ V_n \ \phi \ \theta \ \psi]^T$, $u = [A_b \ \omega_{bx} \ \omega_{by} \ \omega_{bz}]^T$ 이다.

시스템이 정지한 상태인 경우 속도는 0이며 롤 각과 피치 각은 가속도계 측정치로부터 구할 수 있으므로 측정 방정식은 식 (11)과 같이 정할 수 있다.

$$y = Cx + \nu \quad (11)$$

여기서 $y = [V_n^T \ \phi \ \theta]^T$ 이고 $\nu \in R^5$ 인 백색 잡음 벡터이고 $C = [0_{5 \times 3} \ I_{5 \times 1} \ 0_{5 \times 1}]$ 이며 롤 각과 피치 각은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{G_{by}}{G_{bx}} \right) \\ \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{G_{bx}}{\sqrt{G_{by}^2 + G_{bz}^2}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 G_{bx}, G_{by}, G_{bz} 는 각각 동체 좌표계를 따라 측정되는 중력 가속도 성분이며 가속도계 측정치로부터 바로 구할 수 있다.

칼만 필터는 본래 선형 시스템에 대해 유도되는 시스템의 내부 상태 변수 또는 매개 변수의 추정에 사용되는 기법으로 식 (10)과 같은 비선형 시스템에 적용하기 위해서는 선형화 과정이 필요하다. 이를 위해서는 식 (13)과 (14)와 같은 명목

동력학 방정식과 명목 측정 방정식이 필요하다.

$$\dot{\bar{x}} = f(\bar{x}, \bar{u}) \quad (13)$$

$$\bar{y} = C\bar{x} + \nu \quad (14)$$

식 (10)과 식 (12)로 표현되는 원 시스템의 변수와 식 (13) - (14)로 표현되는 명목 시스템의 변수는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} x &= \bar{x} + \delta x \\ u &= \bar{u} + \delta u \\ y &= \bar{y} + \delta y \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에 기반해 식 (10)과 식 (12)를 명목 시스템 변수 $\bar{x}, \bar{u}, \bar{y}$ 근방에서 테일러 시리즈 전개를 하면 식 (16)과 (17)을 얻는다.

$$\dot{x} = \dot{\bar{x}} + \delta \dot{x} = f(\bar{x} + \delta x, \bar{u} + \delta u) + \omega = f(\bar{x}, \bar{u}) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=\bar{x}} \delta x + \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{u=\bar{u}} \delta u + H.O.T + \omega \quad (16)$$

$$y = \bar{y} + \delta y = C(\bar{x} + \delta x) + \nu = C\bar{x} + C\delta x + H.O.T. + \nu \quad (17)$$

여기서 $H.O.T$ 는 무시 가능한 고차항이다.

식 (16)~(17)을 정리하여 식 (18)의 오차 동력학 방정식과 오차 측정 방정식을 얻을 수 있으며 이에 다시 상태 변수 확장 기법을 적용해 식 (19)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{x} &= A \delta x + B \delta u + \omega \\ \delta y &= C \delta x + \nu \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $A = \frac{\partial f}{\partial x}$ 이며 $B = \frac{\partial f}{\partial u}$ 이다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{x}_a &= A_a x_a + w_a \\ \delta y &= C_a \delta x_a + \nu \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 $\delta x_a = [\delta x^T \ \delta u^T]^T$ 이고,

$$A_a = \begin{bmatrix} A & B \\ 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix}, \quad C_a = [C \ 0_{5 \times 6}]$$

이다.

식 (19)는 선형 시스템이므로 여기에 대해 기존의 선형 칼만 필터 기법을 적용할 수 있다. 이 때 매 샘플링 순간마다 계산이 필요한 값은 식 (19)의 A_a 와 δy 이며 이들을 계산하기 위해서는 명목 시스템의 값 $\bar{x}, \bar{u}, \bar{y}$ 가 필요하다. 그러나 명목 시스템은 가상적인 시스템으로 이를 실제로 구할 수는 없으므로 이 값들을 SDINS에서 계산되는 값으로 대체한다. 이는 확장 칼만 필터 기법에 해당되며 이를 요약하면 다음과 같다.

식 (19)의 공정 잡음 공분산 행렬을 Q 라하고, 측정 잡음 공분산 행렬을 R 라 하자. 식 (19)는 아날로그 시스템에 대해 유도되었으나 실제 적용을 위해서는 이산화 과정이 필요하다. 샘플링 주기를 T 라 할 때 이산치 시스템의 공정 잡음 공분산 행렬은 $Q_d = QT$ 로 주어지며 R 은 아날로그 시스템과 디지털 시스템에 공통으로 사용 가능하므로 이산화 과정이 필요 없다.

시간 $t = kT$ 에서 칼만 필터에 입력되는 오차 측정치 $\delta y(kT)$ 는 식 (19)와 같이 주어진다.

$$\delta y(kT) = y(kT) - \bar{y}(kT) \quad (20)$$

여기서 $y(kT)$ 는 식 (21)과 같으며 $\bar{y}(kT)$ 는 SINDS의 계산값으로부터 얻을 수 있다.

$$y(kT) = Cx + v = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{G_{by}(kT)}{G_{bx}(kT)}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{G_{bz}(kT)}{\sqrt{G_{by}(kT)^2 + G_{bx}(kT)^2}}\right) \end{bmatrix} \quad (21)$$

칼만 이득 $K(kT)$ 는 식 (22)와 같이 계산한다.

$$K(kT) = P^-(kT)C_a(kT)^T [R + C_{a(kT)}P(kT)^-1C_{a(kT)}^T]^{-1} \quad (22)$$

여기서 P 는 오차 공분산 행렬이다.

식 (20)의 오차 측정치에 의해 상태 변수의 오차와 공분산 행렬의 갱신을 수행한다.

$$\delta \hat{x}_a(kT) = \delta \hat{x}_a^-(kT) + K(kT)[\delta y - C(kT)\delta \hat{x}_a^-(kT)] \quad (23)$$

$$P(kT) = [I - K(kT)C_a(kT)]P(kT)^- \quad (24)$$

구해진 상태 변수 오차 $\delta \hat{x}_a$ 를 이용해 펜 시스템의 SDINS의 내부 상태 변수 $x_a(kT)$ 는 다음과 같이 갱신된다.

$$\begin{bmatrix} x(kT) \\ u(kT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(kT) \\ u(kT) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \hat{x}(kT) \\ \delta \hat{u}(kT) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$t = kT$ 에서 추정된 $t = kT + T$ 의 공분산 행렬은 다음과 같이 계산하며 칼만 필터의 오차 상태 변수 δx_a 는 0으로 재설정된다 [26].

$$\begin{aligned} G_a(kT) &= \exp(A_a T) \\ \delta \hat{x}_a^-(kT + T) &= G_a(kT)\delta \hat{x}_a(kT) \\ P^-(kT + T) &= G_a(kT)P(kT)G_a(kT)^T + Q_a(kT) \end{aligned} \quad (26)$$

그림 5에 초기 자세 계산의 블록도를 보인다.

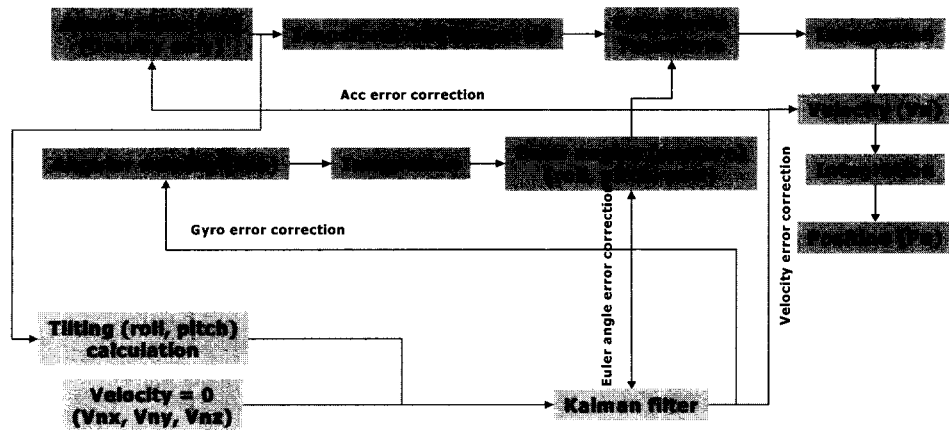


그림 5. 초기 자세 계산 블록도

Fig. 5. Block diagram of calculating the initial attitude of the system

D. 시스템의 운동 감지

앞서 유도한 초기 자세 계산 알고리즘은 시스템이 정지하였을 때 사용가능하다. 여기서는 시스템이 정지하는 경우를 실제적인 정지와 더불어 사용 중에 사용자가 입력을 잠시 멈추는 경우도 정지 상태로 가정하였다. 기존의 SDINS가 탑재되는 플랫폼과는 달리 본 논문의 펜 형 입력 장치는 운동 여부를 감지하는 장치가 존재하지 않으므로 관성 센서의 출력치만을 이용해 이를 감지해야 한다. 가속도의 경우 사용 가능한 값은 가속도 센서의 원 출력값인 동체 가속도 A_b 와 SDINS가 계산한 절대 좌표계에서 본 값 A_n 이 있다. A_b 의 경우 시스템의 자세에 따른 값의 변화가 심하며 A_n 의 경우는 계산 과정 중에 각속도 측정치의 오차가 누적되어 영향을 미치므로 본 논문에서는 각속도 측정치만을 이용해 시스템의 운동 여부를 판단한다. 이를 위해 먼저 식 (27)와 같은 척도를 설정한다.

$$m(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \sqrt{\omega_{bx}^2 + \omega_{by}^2 + \omega_{bz}^2} > m_{th} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

$m(t)$ 는 3축 각속도가 모두 0인 경우에 발화되어 운동 중에도 시스템의 각속도의 부호가 바뀌는 경우 발화될 가능성이 있으므로 움직임의 검지는 식 (28)을 사용한다.

$$M(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } m(\tau) = 1, t_{\star T} < \tau < t \text{ and } t - t_{\star T} > t_{th} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

여기서 $t_{\star T}$ 는 $m(t)$ 가 발화되는 시점이며 t_{th} 는 미리 설정하는 문턱치이다.

이후 설명의 편의를 위해 $M(t)$ 가 0에서 1로 바뀌는 순간, 즉, 운동이 시작되는 순간을 t_1 이라 두고 1에서 0으로 바뀌는 순간, 즉, 운동이 종료되는 순간을 t_2 라 둔다.

E. 영속도 보정 (Zero Velocity Compensation; ZVC)

시스템이 운동 중인 경우는 순수하게 항법 방정식 (3)만으로 시스템의 3차원 운동을 계산한다. 그러나 초기 자세의 계산이 정확하더라도 관성 센서의 잡음, 상수 드리프트, 주위 온도, 센서 간의 비정렬 오차 등으로 인해 정확한 운동 추종이

불가능하다. 기존 항법 시스템의 경우 다양한 보조 항법 센서를 이용해 SDINS의 오차를 보정하는 보조 INS (AINS; Aided INS) 기법 [26]을 사용하나 본 논문의 시스템은 물리적인 크기, 전원, 가격의 제한으로 인해 이러한 센서의 장착이 바람직하지 않다. 그러나 보조 센서가 없는 경우에도 시스템의 운동 전 후의 속도는 0이라는 물리적인 제약 조건을 이용해 운동 중 오차를 오프라인으로 보정할 수 있으며 이를 영속도 보정 (Zero Velocity Compensation; ZVC)이라 한다.

먼저 앞서의 운동 감지 알고리즘에 의해 결정된 시스템의 운동 시작 시간을 t_1 , 종료 시간을 t_2 라 하자. 이 기간 동안 SDINS에 의해 계산된 절대 좌표계에서의 가속도는 식 (29)와 같다.

$$\widehat{A}_n(t) = A_n(t) + d(t) \quad (29)$$

여기서 \widehat{A}_n 는 SDINS에 의해 계산된 가속도, A_n 은 실제 가속도, d 는 오차항이다.

운동 종료 후의 속도는 0이라는 조건으로부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$\widehat{V}_n(t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \widehat{A}_n(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} A_n(t) + d(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} d(t) dt \quad (30)$$

오차 $d(t)$ 는 다양하게 모델링 할 수 있으며 $d(t)$ 를 미지 상수로 두는 경우의 해는 식 (31)과 같다.

$$d(t) = \frac{\widehat{V}_n(t_2)}{t_2 - t_1} \quad (31)$$

실제 시스템에 대한 실험 결과 $d(t)$ 를 미지 상수로 두어도 충분한 위치 추종 성능의 향상을 보였다. 더욱이 오차를 상수로 모델링을 하여 계산량을 줄일 수 있는 장점도 있다.

보정된 운동 중의 속도 $V_n^C(t)$ 와 위치 $P_n^C(t)$ 는 다음과 같다.

$$V_n^C(t) = \int_{t_1}^t (\widehat{A}_n(\tau) - d) d\tau \quad (t_1 < t < t_2) \quad (32)$$

$$P_n^C(t) = \int_{t_1}^t V_n^C(\tau) d\tau, \quad (t_1 < t < t_2) \quad (33)$$

영속도 보정 알고리즘을 수행하기 위해서는 D 절의 운동 감지 알고리즘이 동시에 사용되어야 하며 이를 포함한 전체 알고리즘을 다음에 요약한다.

Step 1 : $t = kT$ 의 순간에 시스템의 운동 여부를 식 (28)을 통해 감지한다.

Step 1-A: $M(kT - T) = 0$ 이고 $M(kT) = 1$ 이면 시스템이 운동을 시작하는 경우이며 $t_1 = kT$ 로 설정하고 Step 3-D에서 계산한 롤 각과 피치 각을 식 (3)의 항법 방정식의 초기치로 설정한다.

Step 1-B: $M(kT - T) = 1$ 이고 $M(kT) = 0$ 이면 시스템이 운동중인 경우이며 식 (3)의 항법 방정식을 이용해 시스템의 위치, 속도, 자세를 계산한다.

Step 1-C: $M(kT - T) = 1$ 이고 $M(kT) = 0$ 이면 시스템이 운동을 종료하는 경우이며 $t_2 = kT$ 로 설정하고 식 (31) - (33)을 이용해 t_1 과 t_2 사이의 시스템의 위치와 속도를 보정한다.

Step 1-D: $M(kT - T) = 0$ 이고 $M(kT) = 0$ 이면 시스템이 정지한 경우이며 식 (20) - (26)을 이용해 초기 자세 계산을 수행한다.

Step 2 : $k = k + 1$. Step 1로 진행.

4. 실험

이 절에서는 본 논문에서 개발한 시스템과 알고리즘을 이용해 실제 입력을 수행하여 그 성능을 분석한다. 실험은 두 경우로 나누어 수행된다. 첫 번째는 2차원 평면상에서의 입력 성능 평가이며 두 번째는 3차원 공간상에서의 입력 성능 평가이다.

2차원 평면에 대한 입력 성능을 평가하기 위한 평가 시스템을 그림 6에 보인다. 절대 위치와의 평가를 위해 Wacom사의 Intuous 태블릿 시스템을 사용한다. 태블릿은 절대 위치의 측정이 가능하므로 본 논문의 시스템의 성능 평가를 위해 선정되었다. DAQPad-6020E를 통해 얻어진 펜 시스템의 측정치와 USB 포트를 통해 얻어진 태블릿의 측정치는 Visual C++ 6.0으로 작성한 데이터 수집 프로그램을 통해 PC에 저장된다. 저장된 관성 측정치를 이용한 궤적 복원은 Matlab을 통해 수행된다. 본 논문의 시스템이 3차원 상에서의 입력을 가정하고 있고 여러 획으로 이루어진 문자의 입력을 하는 경우 각 획 사이의 분리 문제가 있으므로 Palm Computing사의 그래피티 (Graffiti) 단일 획 문자 입력 방식을 선정하였다. 그림 8은 그래피티 입력 표를 보인다

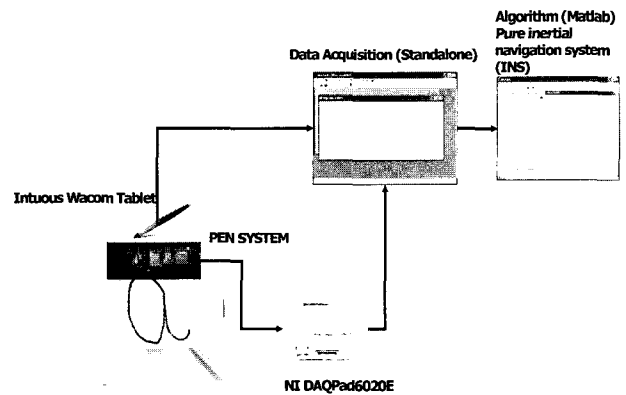


그림 6. 평가 시스템

Fig. 6. Evaluation system

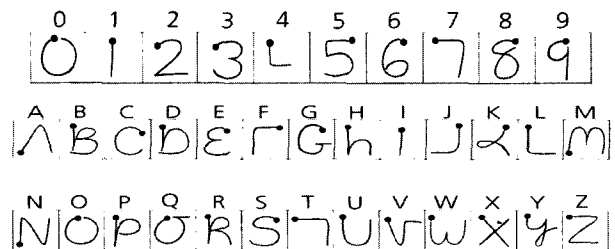


그림 7. 팜 그래피티 표

Fig. 7 Palm Graffiti table

시스템의 성능 평가를 위해 먼저 식 (34)를 정의하자.

$$J_1 = \frac{1}{T} \int_0^T [C(\psi^*)P_{pen}(t) - P_{tablet}(t)]dt \quad (34)$$

여기서 P_{pen} 은 본 논문에서 제안한 시스템에 의해 계산된 사용자 입력의 위치 궤적 정보, P_{tablet} 은 Wacom 시스템으로부터 구한 위치 정보로 z축 값을 0으로 두며 $\psi^* = \min_{0 \leq \psi < 2\pi} \frac{1}{T} \int_0^T C(\psi)P_{pen}(t) - P_{tablet}(t)dt$ 이고 $C(\psi^*)$ 는 회전 행렬이며 다음과 같이 주어진다.

$$C(\psi^*) = \begin{bmatrix} \cos(\psi^*) & \sin(\psi^*) & 0 \\ -\sin(\psi^*) & \cos(\psi^*) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

태블릿 시스템과 펜 시스템의 위치 정보의 차를 각 축에 대해 정확하게 구하기 위해서는 두 시스템간의 정확한 방향 각의 차이를 구할 수 있어야 하나 현 측정 시스템에서 이를 구하는 것은 불가능하므로 앞서와 같이 본 논문에서는 두 값 P_{pen} 과 P_{tablet} 간의 방향각 차이인 ψ^* 를 수치적으로 구한다. 식 (34)는 본 논문에서 제안한 시스템의 각 축의 위치 오차의 시간 평균 값이다. 그러나 인간의 필기 동작은 그 특성 상 매번 필기 시간이 달라지게 되며 따라서 매 측정 시 서로 다른 필기 시간 T 를 얻게 된다. 또한 시간에 따라 오차가 증가하는 SDINS 시스템의 특성으로 인해 동일한 측정치라 하더라도 T 값을 달리 설정함에 따라 다른 결과를 얻을 가능성이 있다. 이러한 문제점으로 인해 성능 평가 척도는 식 (35)를 사용한다.

$$J = \left\| \frac{2J_1}{T^2} \right\|_2 \quad (35)$$

실험 결과 위치 오차는 대체로 시간의 자승에 비례하여 증가함을 확인하였으며 따라서 식 (35)를 사용함으로써 앞서 언급했던 식 (34)의 척도의 문제점을 해결할 수 있다.

궤적 복원 알고리즘을 위한 매개 변수는 실험적으로 구하였으며 다음과 같다. $P^-(0) = 0$, 공정 잡음 공분산 행렬 Q 와 측정 잡음 공분산 행렬 R 의 대각 원소는 모두 0.001로 설정하였으며 움직임 감지를 위한 문턱치 $m_{th} = 0.1$ (rad), $t_{th} = 30msec$ 로 설정하였다.

평가는 3인의 피험자가 그림 7에 도시한 필기 동작을 각각 1회 반복하여 수집한 데이터를 바탕으로 수행하였으며 피험자의 인지 사항은 다음과 같이 주어진다.

- 글씨는 태블릿 내에 들어가도록 쓸 것
- 글씨를 쓰기 전후에 약간 정지할 것

- 필기 문자는 그림 7의 입력 방법을 사용할 것

본 논문에서 제안한 시스템의 비교 평가 대상은 그림 8의 아날로그 디바이스사의 2축 가속도계 ADXL202E의 평가 보드인 ADXL202EB-232A를 선정하였다. 해당 시스템은 2축 가속도만을 측정하는 시스템이기는 하나 평면 상에서의 궤적 복원에 적용 가능하므로 펜 시스템의 2차원 필기 궤적 복원 성능의 평가 대상으로 사용할 수 있다. 실험 결과 ADXL202EB-232A는 2차원 평면 상에서 약 5초 동안의 필기 궤적 복원이 가능하였으며 이 때의 가속도 오차는 $0.0196m/s^2$ 이다.

복원된 필기 궤적의 예를 그림 9 - 10에 보인다. 그림 9는 0-9, A-Z의 필적 복원 결과를 보인다. 그림 10은 특정 문자에 대해 태블릿에 그려진 실제 필기 궤적과 제안한 시스템에 의해 복원된 궤적의 비교를 수행한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 필기 궤적의 복원이 매우 정확하게 되고 있음을 알 수 있다. 그림 9의 복원 결과는 회전 변환을 수행하지 않은 결과임으로 몇몇 문자(예: 영문자 i)의 경우 이를 감안하여 평가하여야 한다. 이는 정량적인 측정을 위해 각 피험자의 필기 궤적에 대해 식 (34)의 척도를 계산하였으며 이를 표 1에 보인다. 성능 척도의 평균은 $0.00733 m/s^2$ 이며 앞서 ADXL202EB-232A의 가속도 오차와 비교해 볼 때 본 시스템의 성능이 매우 우수함을 알 수 있다. 더욱 정확한 평가를 하기 위해서는 ADXL202EB-232A와 펜 시스템에 동일한 가속도, 즉, 동일한 사용자의 필기 동작이 가해져야 하나 이는 기구적인 특성 상 어려운 관계로 평균 성능을 비교하였다.

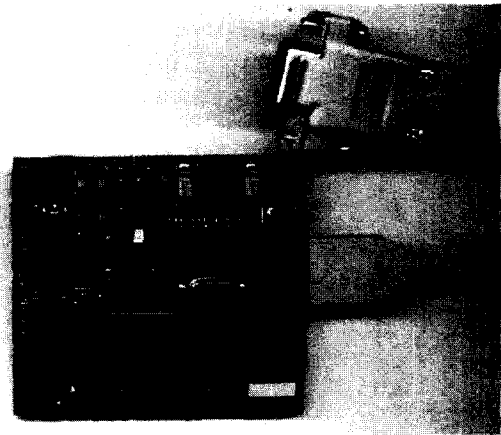


그림 8. ADXL202EB-232A

Fig. 8. ADXL202EB-232A

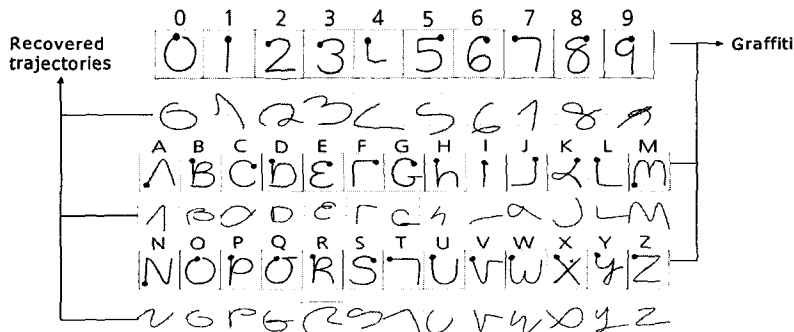
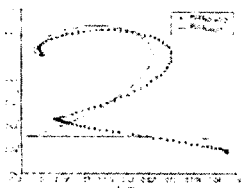


그림 9. 복원된 필기 궤적

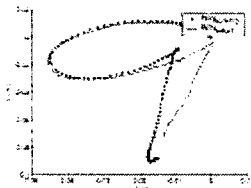
Fig. 9. Recovered trajectories

표 1. 펜 형 입력 장치의 입력 성능 평가
Table 1. Performance comparisons of the presented pen-shaped input device

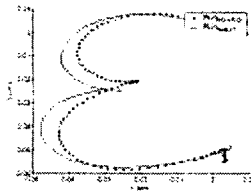
문자	J	피험자 1 (m/s^2)	피험자 2 (m/s^2)	피험자 3 (m/s^2)
0		0.00711	0.01086	0.00407
1		0.00267	0.01968	0.00152
2		0.00206	0.02409	0.01177
3		0.00965	0.00905	0.012
4		0.00161	0.00346	0.00134
5		0.00502	0.003	0.0029
6		0.0075	0.00086	0.00312
7		0.00194	0.00281	0.00453
8		0.02236	0.01543	0.00875
9		0.00089	0.01095	0.0084
A		0.00996	0.00533	0.00566
B		0.00926	0.01811	0.00712
C		0.0049	0.00438	0.0017
D		0.01025	0.01838	0.00109
E		0.00276	0.0239	0.00307
F		0.00406	0.00469	0.00472
G		0.01582	0.01882	0.01049
H		0.00199	0.01643	0.00706
I		0.00137	0.0091	0.0046
J		0.00092	0.01663	0.01143
K		0.00225	0.00968	0.00552
L		0.00405	0.01608	0.00352
M		0.0081	0.01257	0.01154
N		0.00493	0.00146	0.00207
O		0.02343	0.01895	0.00212
P		0.01416	0.00347	0.00489
Q		0.00947	0.02459	0.00482
R		0.00822	0.01156	0.00499
S		0.00813	0.00358	0.00107
T		0.00507	0.00232	0.00292
U		0.00413	0.00405	0.00394
V		0.00436	0.00532	0.00658
W		0.00424	0.00336	0.00204
X		0.00263	0.0028	0.01467
Y		0.00415	0.00578	0.00379
Z		0.00421	0.00582	0.00091



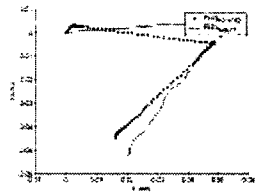
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 10. 펜 시스템과 태블릿의 궤적 비교 (점선: 펜 시스템, 실선: 태블릿). (a) 숫자 2 (b) 숫자 9 (c) 영문자 E (d) 숫자 7
Fig. 10. Comparisons of trajectories of the pen system and those of the Tablet system (dotted line: pen system, solid line: Tablet system) (a) number 2 (b) number 9 (c) Alphabet E (d) number 7

다음으로 3차원 공간상에서의 입력 성능을 평가 한다. 3차원 입력의 경우 3차원 위치 측정 장비가 없으므로 정성적인 평가로 대신한다. 그림 11에 공간에서 필기체 소문자로 samsung을 입력한 결과를 도시하였다. 이 경우는 각 글자를 공간에서 쓴 후 약간의 지연 시간을 가지고 다음 글자로 진행하는 방법을 취하였으며 본 논문에서 사용한 알고리즘에 의해 오차의 심각한 누적 없이 우수하게 필기 궤적 복원이 되었음을 알 수 있다. 그림 12에서는 이러한 제약 없이 연속

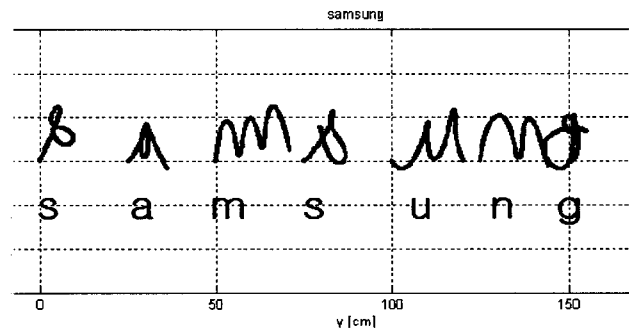


그림 11. 한 단어의 각 문자를 독립적으로 공간상에서 입력
Fig. 11 Repetitive input of the characters of a word in the three dimensional space

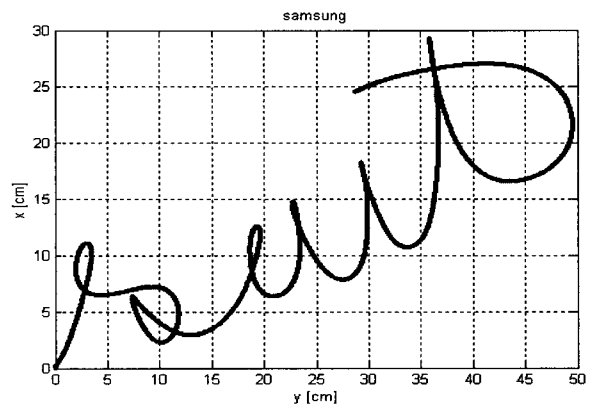


그림 12. 한 단어를 연속적으로 공간상에서 입력
Fig. 12. Continuous input of a word in the three dimensional space

으로 필기체로 sait를 입력하는 경우의 궤적 복원 결과를 보인다. 수 회의 실험 결과 약 5 문자 이내로 이루어진 단어의 경우 또는 서명과 같이 상당히 빠르게 입력을 하는 경우는 인간이 인식할 정도의 궤적 복원이 됨을 알 수 있었다. 특히 그림 12의 연속 단어의 입력 결과는 현재까지 조사된 관련 연구에서 제시되지 않은 것으로 관성 센서를 이용한 시스템이 입력 장치로 기능할 수 있음을 보여주는 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 PDA 또는 웨어러블 컴퓨터와 같은 개인 휴대용 정보 장치의 사용자들이 일반적인 펜을 사용하듯이 자연스럽게 입력이 가능한 디바이스의 개발에 관한 연구 및 그 결과를 제시하였다. 본 논문에서 제안한 입력 장치는 2차원과 3차원 공간에서 자연스러운 필기 동작을 통한 입력이 가능하며 펜과 동일한 외관 및 사용성을 가짐으로써 특별한 학습 과정을 요구하지 않는다. 개발된 초소형 관성 센서들을 장착해 사용자의 움직임에 의한 가속도와 각속도 정보를 획득한 후 SDINS 기법을 이용해 필기 궤적을 재현하였다. 기존의 유사 연구 결과들 [13-14, 17]과 달리 센서에서 측정된 가속도 값을 펜 선단의 가속도 값으로 변환하고 온라인 보정 과정에서는 칼만 필터 기법을 이용한 보상 필터 기법을 사용하여 정확한 펜 시스템의 자세를 추정하도록 하였다. 오프라인 교정 과정에서는 오차의 DC 성분을 속도 정보와 움직임 검지 정보를 이용해 보정을 하여 추가적인 성능 향상을 시도하였다. 이러한 기법을 사용해 시간이 지남에 따라 오차가 누적되는 SDINS의 문제를 해결하였으며 2차원 상에서 아라비아 숫자 0-9와 영문 알파벳 26자를 입력하여 정량적 성능 평가를 수행하였고 3차원 공간상에서의 성능을 정성적으로 평가하였다. 실험 결과로부터 제안한 시스템은 2차원과 3차원 상에서 단일 문자 입력을 성공적으로 수행할 수 있으며 연속되는 단어의 입력 또한 우수하게 수행함을 알 수 있었으며 이는 현재까지의 특허 및 논문을 포함한 관련 분야의 연구 결과 중 가장 진보된 결과라 할 수 있다

참고문헌

- [1] Tetuji Aoyagi and Kanagawa, Assignee: Data Stream Corporation, "Wireless pen-type input device for use with a computer," U.S. Patent 5 166 668, Nov. 24, 1992.
- [2] Baron, Ehud Korsensky, Victor Genossar and Omry Genossar, Assignee: Inmotion Technologies Ltd., "Method and system for digitizing handwriting," U.S. Patent 5 977 958, Nov. 2, 1999.
- [3] M. P. Biggs, T. Z. O'Ishi and M. S. Knighton, Assignee: M. S. Knighton, "Ultrasonic pen-type data input device," U.S. Patent 5 308 936, May 3, 1994.
- [4] 關口 英紀, 출원인: Fujitsu, "펜형 입력 장치," 일본 특허 2000-330717, 1999.5.20.
- [5] Kimikatsu Sato, Ryuichi Toyoda and Takeshi Masaki, Assignee: Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., "Pen-type computer input device," U.S. Patent 5027115, Jun. 25, 1991.
- [6] Larry S. Gullman, Assignee: Kumahira Safe Co., Inc., "Stylus for handwriting identification," U.S. Patent 5 111 004, May 5, 1992.
- [7] Stefaan A. Shriver, Assignee: LCI Technology Group, "Systems for imaging written information," U.S. Patent 5 981 883, Nov. 9, 1999.
- [8] Mark Epperson, "Autonomous computer input device and marking instrument," U.S. Patent 5 247 137, Sep. 21, 1993.
- [9] Zvi Orbach and Ehud Baron, Assigned: Zvi Orbach and Ehud Baron, "APPARATUS FOR READING HANDWRITING," WO 94/09447, Apr. 28, 1994.
- [10] Kenich Matsushima, Assignee: Seiko Instruments Inc., "Coordinate detecting apparatus having acceleration detectors," U.S. Patent 5 587 558, Dec. 24, 1996.
- [11] Lamar E. Brooks, Assignee: A.T. Cross Company, "Hand-held electronic writing tool," U.S. Patent 5 434 371, Jul. 18, 1995.
- [12] 高城 邦彦瀬戸 毅, 출원인: SEIKO EPSON, "필기구형 좌표 입력 장치," 일본공개특허 1999-296291, Oct. 29, 1999.
- [13] Yasuhiro Sato, Takao Inoue, Etsuko Fujisawa, Takashi Kitaguchi, Toshiyuki Furuta, Norihiko Murata, and Mitsuru Shingyouchi, Assignee: Ricoh Company, Ltd., "Pen-shaped handwriting input apparatus using accelerometers and gyroscopes and an associated operational device for determining pen movement," U.S. Patent 5 902 968, May 11, 1999.
- [14] D. G. Stork, M. Angelo, and G. J. Wulff, Assignee: Ricoh Company, Ltd., "Method and apparatus for tracking a hand-held writing instrument with multiple sensors that are calibrated by placing the writing instrument in predetermined positions with respect to the writing surface," U.S. Patent 6 186 329, Jan. 30, 2001.
- [15] Micro-Accelerometer based Hardware Interfaces for Wearable Computer Mixed Reality Applications
- [16] H. Ishikawa, Y. Yonezawa, K. Itoh, and M. Hashimoto, "Extraction of character information from acceleration of handwriting pen," Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers D-I, vol.J76D-I, no.10, pp.541-543, Oct. 1993 (in Japanese)
- [17] T. Miyagawa, Y. Yonezawa, K. Itoh, and M. Hashimoto, "Handwritten pattern reproduction using 3D inertial measurement of handwriting movement," Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, vol.38, no.1, Jan. 2002, pp.1-8. Publisher: Soc. Instrum. & Control Eng, Japan

catalog?sHinnmTmp=ENV-05F-03&sLang=2&
sNnm=ENV-05F-03&sHnTyp=NEW

[18] J. H. Morrissey, "Electronic calculator based on character recognition of input from stylus acceleration dynamics," IBM Technical Disclosure Bulletin, vol.19, no.7, pp.2816-17, Dec. 1976.

[19] B. Milner, "Handwriting recognition using acceleration-based motion detection," IEE Colloguium on documents image processing and multimidea, (London, UK), p. 5/1-5/6, 25 March 1999.

[20] R. Baron and P. Plamondon, "Acceleration measurement with an instrumented pen for signature verification and handwriting analysis," IEEE Transactions on instrumentation & measurement, vol. 38, no. 6, pp. 1132-1138, Dec. 1989.

[21] R. Gjone and J. Miraglia, "Pen for signature verification by acceleration and pressure," IBM Technical Disclosure Bulletin, vol.24, no.2, pp.902, July 1981

[22] N. M. Herbst and C. N. Liu, "Signature verification based on complete accelerometry," IBM Technical Disclosure Bulletin, vol.19, no.12, pp.4827-9, May 1977.

[23] D. Strickland, A. Patel, C. Stovall, J. Palmer, D. McAllister D, "Self tracking of human motion for virtual reality systems," Proceedings of Spie - the International Society for Optical Engineering, vol.2177, pp.278-87, 1994.

[24] Seongbae Lee. Gi-Joon Nam. Junseok Chae. Hanseup Kim. Drake AJ., "Two-dimensional position detection system with MEMS accelerometer for mouse applications," Proceedings of the 38th Design Automation Conference (IEEE Cat. No.01CH37232). ACM, pp.852-7. New York, NY. 2001, USA.

[25] J. K. Perng, B. Fisher, S. Hollar, and K. S. J. Pister, "Acceleration sensing glove (ASG)," The third international symposium on wearable computers 1999, pp. 178-180, 18-19 Oct. 1999.

[26] J. A. Farrel and M. Barth, The global positioning system & inertial navigation, McGraw-Hill Inc., 1999.

[27] G. Minkler and J. Minkler, Theory and application of Kalman filtering, Magellan.

[28] S. Sukkariah, Low cost, high integrity, aided inertial navigaion systems for autonomous land vehicles, Ph. D. thesis, The University of Sydney, Mar. 2000.

[29] J. R. Huddle, "Trends in inertial systems technology for high accuracy AUV navigation," in Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles, AUV'98, pp. 63-73, Cambridge, MA, USA, 20-21, Aug. 1998.

[30] KX120-L20 Data Sheet. [Online]. Available: <http://www.kionix.com/KX120-L.pdf>

[31] ENV-05F-03 Data Sheet. [Online]. Available: <http://search.murata.co.jp/Ceramy/owa/CATALOG.show>

저 자 소 개



장욱

1994년 : 연세대 전기공학과 졸업
1996년 : 연세대 대학원 전기공학과 졸업
2001년 : 동 대학원 전기및전자공학과 졸업 (공학박사)
2001년 - 현재 : 삼성전자(주)종합기술원 전문연구원

관심 분야 : 퍼지 제어, 신경망 제어, 유전 알고리즘, 디지털 재설계, 유비쿼터스 컴퓨팅

Phone : 031-280-9275

Fax : 031-280-6957

E-mail : wook.chang@samsung.com



강경호

1997 : 아주대 졸업
1999 : 아주대 대학원 졸업
2001 ~ 현재 : 삼성전자(주)종합기술원 연구원

관심 분야 : 임베디드 시스템, 실시간 운영 체제

Phone : 031-280-6506

Fax : 031-280-6957

E-mail : kyoungho.kang@samsung.com



최은석

1996.2 : 광운대학교 제어계측공학과
1998.2 : 광주과학기술원 기전공학과 (공학석사)
2002.8 : 광주과학기술원 기전공학과 (공학박사)
현재 : 삼성전자(주)종합기술원 전문연구원

관심분야 : 강인제어, 디지털 제어시스템, 센서 응용, 로봇제어

Phone : 031-280-8058

Fax : 031-280-6957

E-mail : eunseok.choi@samsung.com



방원철

1994년 : 한양대 전기공학과 졸업.
1996년 : KAIST 대학원 전기 및 전자공학과 졸업.
2001년 : KAIST 대학원 전자전산학과 졸업(공학박사)
2001년 3월~2002년 8월 : KAIST 인간친화 복지 로봇시스템 연구센터 연구원

2002년 9월~현재 : 삼성전자(주)종합기술원 전문연구원

관심분야 : 지능 제어, 소프트 컴퓨팅, 패턴 인식, 인공 지능, 관성 항법 시스템, 인간-기계 상호작용, 유비쿼터스 컴퓨팅, 웨어러블 컴퓨터

Phone : 031-280-6506

Fax : 031-280-6957

E-mail : wc.bang@samsung.com



김동운

1980 연세대 기계공학과 졸업
1982 한국 과학 기술원 기계 공학과 졸업 (석사)
1993 연세대학원 기계공학과 졸업(박사)
1982~1994 : 한국과학기술원(KIST) 기전 공학부(연구원)

1994~1997 : 기아 자동차 기술 센터(선임연구원)

1997~현재 : 삼성전자(주)종합기술원 수석 연구원

관심 분야 : 지능형 제어 시스템, service robot, INS 등

Phone : 031-280-8189

Fax : 031-280-6957

E-mail : kdy2891@samsung.com



Alexy Potanin

1998 : 러시아 Radio Technical University 졸업
2000 : 러시아 Radio Technical University 대학원 졸업
2002~현재 : 삼성전자(주)종합기술원 연구원

관심분야 : 임베디드 시스템, 유비쿼터스 컴퓨팅

Phone : 031-280-8058

Fax : 031-280-6957

E-mail : alexy.potanin@samsung.com