논문 2011-48TC-3-11

군용 무인차량과 보병의 충돌방지를 위한 제어시스템

(A Control System for Avoiding Collisions between Autonomous Warfare Vehicles and Infantry)

남 세 현*, 정 유 정*

(Sea Hyeon Nam and You Chung Chung)

요 약

본 논문연구에서는 군용 무인차량과 보병의 위치를 실시간으로 추적하여 충돌을 방지하기 위한 제어시스템을 개발하였다. 개발된 제어시스템은 무선장비들의 위치를 추적하기 위하여 저비용의 RSS 측정값을 사용하였다. 다중경로 환경에서 장비들 위치 추적의 정확성을 향상시키기 위하여 수학적 평균 필터링 과정을 거쳐서 RSS 행렬 값들을 계산하였다. 또한 무선통신 환경에서 빈번히 발생하는 손실된 패킷의 복구 또는 대체를 위하여 퍼지 규칙 선행 알고리즘을 개발하였다. 무선장비들 사이의 거리 정보를 기반으로 무선장비의 위치를 추적하기 위하여 그라디언트(gradient) 알고리즘과 기하학적 삼각 추적 알고리즘을 개발하였다. 성능 평가를 위하여 기하학적 삼각 추적 알고리즘의 위치 추적 결과를 GPS에 의한 위치와 그라디언트 알고리즘의 위치 추적 결과와 비교 분석하였다.

Abstract

This paper describes a control system for positioning the real-time locations of the autonomous warfare vehicles and infantry, and for avoiding collisions between them. The control system utilizes the low-cost RSSI (Received Signal Strength Indication) for positioning the locations of the wireless devices. The mathematical mean filtering processes are applied to the calculation of the RSS matrix to improve the performance for positioning the wireless devices in the multi-path propagation environment. A fuzzy rule is proposed to recover and replace the broken packets occurring in the wireless communication. The gradient and geometric triangulation algorithms are proposed to trace the real-time locations of wireless devices, based on the distances between them. The estimated location results of the geometric triangulation algorithm are compared with the results of the GPS and the gradient algorithm.

Keywords : 무인차량 위치추적, 충돌 방지, 삼각 추적 알고리즘

Ⅰ. 서 론

군용 무인차량은 정찰이나 지뢰 제거 등에 많이 쓰이고 있으며, 최근에는 무인 탱크, 자동차, 그리고 비행기 등으로 적용범위가 확대되어지고 있다. 그런데 이 무인 차량들은 훈련이나 실전에서 다른 무인 또는 유인 탱크나 자동차, 그리고 보병과 충돌하는 사고가 발생할 가능성이 있다. 또한 유인 자동차나 탱크들도 야간뿐만 아니라 주간에도 시야확보의 문제로 인하여 보병이나 민간인과 충돌함으로써 사망사고로 이어지는 사례가 있다.

무인차량의 위치추적 (AVL: Autonomous Vehicle Location) 그리고 무인차량의 모니터링 (AVM: Autonomous Vehicle Monitoring) 기법은 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔다[1~7]. AVL과 AVM의 최근 응용 분야로는 렌트카의 위치추적, 긴급 차량의 파견, 방문자의 안내, 네비게이션 시스템에서 차량의 위치 파악, 그리고 휴대 전화망에서 사용자 위치추적 등이 있다.

무선 단말기를 탑재한 차량이나 사람의 위치를 추적

* 정회원, 대구대학교 정보통신공학부
(Daegu University)
※ 이 논문은 2010학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.
접수일자: 2010년6월10일, 수정완료일: 2011년3월17일

하는 목적으로 개발된 기존의 방식으로는, 먼저 무선신호의 크기를 이용하여 추적하는 RSS (Received signal strength) 방식[5, 8~9], 무선신호의 방향을 이용하여 추적하는 AOA/DOA (Angle/direction of arrival) 방식[6, 10], 무선신호의 도착시간을 고려하는 TOA (Time of arrival) 방식[1, 4, 6], 무선신호의 도착시간의 차이로 계산하는 TDOA (Time Difference of Arrival) 방식[1, 4], 그리고 GSM(Global system for mobile communication)을 이용하는 방식[11] 등이 있다.

RSS 방식은 무선 단말기들의 위치를 추적하는데 수신 신호의 감쇠를 이용한 수학적 모델을 사용한다. 이 방식은 무선 단말기들의 RSS 측정값만을 이용하기 때문에 추가적인 장비가 불필요한 방식이므로 상대적으로 쉽게 추적 시스템의 구현이 가능하다. RSS 측정에 기반을 둔 기존의 위치 추적 시스템들은 다중경로 환경과 패킷 손실 복구 문제를 고려하지 않았기 때문에 예측의 정확성이 높지 못하였다.

AOA 방식은 기지국에서 안테나의 복잡한 배열을 사용하여 무선신호의 입사 각도를 측정한다. 기지국에서 측정된 입사 각도는 무선 단말기의 위치를 추적하는데 사용된다[10].

TOA는 다수의 기지국에서 무선 단말기에 의해 전송된 신호의 도착 시간을 측정한다. 최소한 3개의 기지국에서 측정된 도착 시간이 거리로 변환되며, 그 정보를 이용하여 무선 단말기의 위치가 계산된다. 이 방식의 단점은 간접적인 전파 전달이 TOA 측정에 오류를 줄 수 있다는 점이다. 이 문제는 TDOA 방식으로 극복할 수 있다. TDOA 방식에서는 두 기지국에서 무선신호 도착 시간의 차이를 측정한다.

GSM 통신망은 전 세계에 로밍 기능을 갖추고 고품질 모바일 음성 및 데이터 서비스를 제공한다. 또한 GSM 시스템은 DOA, TOA, TDOA, 그리고 Timing Advance (TA) 기술을 이용하여 이동 단말기의 위치를 추적할 수 있다. GSM 통신망에서 TOA와 TDOA를 이용한 위치추적은 기존의 TOA와 TDOA 방식과 동일한 원리이다. GSM 통신망에서 TOA와 TDOA 방식에 대한 실제 실험과 모의실험 결과 그 거리 오차가 약 150-200m로 나타나 차량 충돌 방지 시스템으로 사용하기가 곤란하다.

한편 무선 네트워크를 이용한 충돌방지 시스템의 개발은 그동안 활발히 연구되어온 분야이며, 근거리 패킷 무선 통신 기술을 사용하는 해군의 충돌방지 시스템이 제안된 바 있다. 이러한 시스템은 안개 낀 날이나 야간시의 선박 충돌을 방지할 수 있다[12]. 참고 문헌 [13~14]에서는 ray tracing 기법의 다중경로 환경과 모델링 기법을 보여준다. 또한 다중경로 문제를 해결하기 위한 방안으로 퍼지 로직이 시스템 모델링과 삼각 측량에 적용되기도 하였다[5].

본 논문연구에서는 군용 무인차량과 보병의 위치를 실시간으로 추적하여 충돌을 방지하기 위한 제어시스템을 개발하였다. 개발된 제어시스템은 무선장비들의 위치를 추적하기 위하여 저비용의 RSS 측정값을 사용하였고 다중경로 환경에서 장비들 위치 추적의 정확성을 향상시키기 위하여 수학적 평균 필터링 과정을 거쳐서 RSS 행렬 값들을 계산하였다. 또한 무선통신 환경에서 빈번히 발생하는 손실된 패킷의 복구 또는 대체를 위하여 퍼지 규칙 선행 알고리즘을 개발하였다. 무선장비들 사이의 거리 정보를 기반으로 무선장비의 위치를 추적하기 위한 그라디언트 알고리즘과 기하학적 삼각 추적 알고리즘을 개발하였으며 이들 알고리즘들의 위치 추적 결과 데이터를 이용하여 성능을 비교 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅰ장 서론에 이어서 Ⅱ장에서는 군용 무인차량과 보병의 충돌 방지를 위한 제어시스템의 구성 요소를 설명하고, RSS 행렬을 계산하는데 이용된 수학적 평균 필터링과정과 손실된 패킷의 복구를 위한 퍼지 규칙 선행 알고리즘을 설명한다. Ⅲ장에서는 RSS 행렬로부터 무선장비들 사이의 거리 정보를 얻기 위한 모델링 과정이 서술된다. Ⅳ장에서는 계산된 거리 행렬을 기반으로 장비의 위치를 추적하는데 사용되는 그라디언트와 기하학적 삼각 추적 알고리즘이 기술되어 있다. Ⅴ장에서는 제안된 알고리즘들의 성능 평가를 하였고, 마지막으로 Ⅵ장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 구성

군용 무인차량과 보병의 위치를 실시간으로 추적하여 충돌을 방지하기 위한 제어 시스템의 개략적인 구성은 그림 1과 같다. 그림 1에서 무선통신장비(#1, 2, 3)들은 고정된 위치에 있거나 또는 GPS를 탑재하여 실시간으로 정확한 위치가 파악되는 장비들이다. 이 외에도 보병이 장착하는 이동무선장비와 군용 차량에 탑재되는 차량용 무선장비들이 있다.

무선통신장비들은 본 논문에서 제안하는 위치 추적

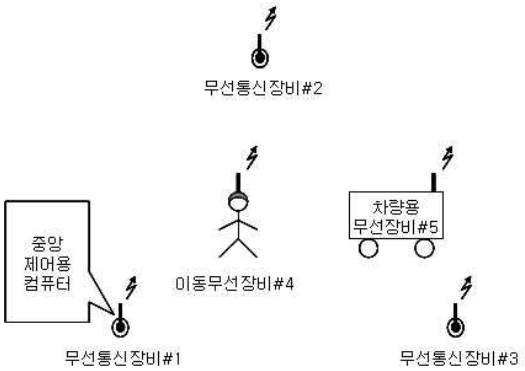


그림 1. 충돌방지 제어시스템의 구성도
Fig. 1. Control system for collision avoidance.

알고리즘의 핵심 장비들로서 시스템 전체로 3대 이상이 필요하다. 그 중에서 무선통신장비#1에는 중앙 제어용 컴퓨터가 연결되어 있다. 이 중앙 제어용 컴퓨터에서는 위치 추적 알고리즘을 사용하여 보병에 장착된 이동무선장비와 군용 차량에 탑재된 차량용 무선장비들의 위치를 실시간으로 계산하여 추적한다. 중앙 제어용 컴퓨터는 보병과 군용 차량이 어느 일정 거리 이하로 근접할 경우 위험주의, 위험경고, 그리고 차량정지 명령을 차례로 내보내어 충돌을 방지한다.

충돌방지 제어시스템의 모든 무선장비들은 매 초 마다 반복되는 프레임의 일정 슬롯을 할당 받아 라운드-로빈 방식으로 돌아가며 패킷을 송신한다. 하나의 무선장비가 송신을 하게 되면 다른 모든 무선장비들은 수신상태가 되어 송신 무선장비의 ID, 수신 신호의 세기($[S_{ij}]$ 행렬), 그리고 송신 무선장비의 상태 정보를 포함하는 패킷을 수신하게 된다. 본 논문에서는 모든 무선장비의 송수신기에 방향성이 없는 모노폴 형태의 안테나를 사용하였고, 무선장비들의 위치를 추적하기 위하여 저비용의 RSS 측정값을 이용하였다.

무선장비#i가 송신한 신호를 무선장비#j가 수신했을 때의 수신 신호 세기를 S_{ij}로 정의하면 식 (1)과 같이 n개의 무선장비들 사이의 RSS 행렬 $[S_{ij}]$를 얻게 된다. 각 무선장비들은 매 프레임마다 자신이 수신한 RSS 값들과 다른 무선장비들로부터 수신한 RSS 값들을 다음 프레임에서 $[S_{ij}]$ 행렬에 실어서 송신하므로, 다른 모든 무선장비들이 이 값들을 알 수 있게 된다. 특히, 그 중에서 무선통신장비#1에 연결된 중앙 제어용 컴퓨터는 갱신되는 $[S_{ij}]$ 행렬 값을 이용하여 매 프레임마다 모든 무선장비들의 위치를 실시간으로 계산하여 추적한다.

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdot & S_{1j} & \cdot & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdot & S_{2j} & \cdot & S_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ S_{i1} & S_{i2} & \cdot & S_{ij} & \cdot & S_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdot & S_{nj} & \cdot & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

본 논문에서는 무선통신으로 인하여 발생하는 다중경로 환경에서 장비들 위치 추적의 정확성을 향상시키기 위하여 세 단계의 수학적 평균 필터링 과정을 거쳐서 RSS 행렬 값들을 계산하였다. 첫 번째 단계로 모든 무선장비들은 다른 무선장비들이 패킷 전송을 하는 동안 매 슬롯마다 718개의 RSS 샘플링을 하여 이들의 평균값을 S_{ij}로 사용한다. 이렇게 대규모로 샘플링하고 그 평균값을 취함으로서 다중 경로에 의해 신호의 세기가 시간적으로 많이 변화하는 것을 필터링하게 된다.

두 번째 단계로 중앙 제어용 컴퓨터에서는 S_{ij} 샘플 중에서 최대로 최근 5개의 샘플에 대한 평균값을 구하여 실제 S_{ij}값으로 사용한다. 현재 프레임의 수신 신호 세기를 $S_{ij}(t)$, n 프레임 이전의 수신 신호 세기를 $S_{ij}(t-n)$이라 하면, 시간 도메인 필터링 과정은 다음과 같다: $S_{ij}(t) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} S_{ij}(t-n)$, $(N \leq 5)$. 따라서 $S_{ij}(t)$는 최근 최대 5개 RSS 값들의 평균이므로 다중경로에 의해 발생하는 오류의 영향이 매우 작아지게 된다.

실제로 측정된 RSS 행렬에서 S_{ij} 신호 세기가 S_{ji} 신호 세기와 일반적으로 다르기 때문에 완벽한 대칭성을 갖지 않는다. 따라서 세 번째 단계의 수학적 필터링 과정에서는 S_{ij}와 S_{ji}의 평균값을 계산하여 실제 S_{ij}값으로 사용함으로써 대칭적인 RSS 행렬을 생성하게 된다.

한편 무선통신 환경은 유선통신 환경에 비하여 패킷의 손실이 발생할 가능성이 크기 때문에 손실된 패킷의 복구 또는 대체 알고리즘이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 손실된 패킷의 복구 알고리즘으로 아래와 같은 간단한 퍼지 규칙 선행 알고리즘을 사용하였다.

(1) $S_{ij}(t)$가 손실된 경우, $S_{ji}(t)$로 대체한다.

(2) $S_{ij}(t)$와 $S_{ji}(t)$가 모두 손실되고 $S_{ij}(t-1)$와 $S_{ji}(t-1)$는 존재하는 경우, $[S_{ij}(t-1),\ S_{ji}(t-1)]$의 평균값으로 대체한다.

(3) $S_{ij}(t)$, $S_{ji}(t)$, 그리고 $S_{ji}(t-1)$가 모두 손실된

경우, $S_{ij}(t-1)$로 대체한다.

(4) $S_{ij}(t)$, $S_{ji}(t)$, 그리고 $S_{ij}(t-1)$가 모두 손실된 경우, $S_{ji}(t-1)$로 대체한다.

(5) $S_{ij}(t)$, $S_{ji}(t)$, $S_{ij}(t-1)$, 그리고 $S_{ji}(t-1)$가 모두 손실된 경우, $[S_{ij}(t-2),\ S_{ji}(t-2)]$의 평균값으로 대체한다.

(6) 상기의 절차로도 복구가 안 되는 경우, '통신 문제 경고' 플래그를 세트하고 시스템을 정지시킨다.

(7) 수신 신호 세기 $S_{ij}(t)$가 이전의 $S_{ij}(t-n)$ 값들과 비교하여 월등하게 작거나 또는 큰 값이 갑자기 나타나는 경우, 이는 무선 패킷 통신 과정에서 발생한 데이터 오류일 가능성이 크므로 위에 서술된 복구 알고리즘((1)-(5) 과정)을 적용하여 적절한 값으로 대체한다.

이상의 과정을 거친 후 중앙 제어용 컴퓨터에서는 위치 추적 알고리즘에서 사용할 수 있는 RSS 행렬을 갖추게 된다.

Ⅲ. 전파 모델링

무선 장비들 사이의 거리 R과 수신측 안테나에서의 수신 신호 세기와의 관계는 아래와 같이 프리스(Friis) 식으로 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\lambda}{4\pi}\sqrt{\frac{P_t G_r G_t}{P_r}} \tag{2}$$

여기서,

P_r = 수신측 안테나 터미널에서의 전력

P_t = 송신측 안테나 터미널에서의 전력

R = 송신측과 수신측 안테나 사이의 거리

G_t = 송신측 안테나의 이득

G_r = 수신측 안테나의 이득

위 수식은 전파의 다중 경로와 장애물로 인하여 발생하는 감쇠 등의 페이딩 현상이 고려되지 않은 수식이다. 따라서 실제 다양한 필드 환경에 그대로 적용하기에는 오차가 있는 근사공식이다.

본 논문연구에서 제안하는 군용 차량과 보병의 충돌을 방지하기 위한 제어시스템에서는 정밀한 거리 추적이 요구되므로 프리스 식을 사용하지 않고 대신에 실제 다양한 환경에서 측정한 거리와 신호 세기의 데이터를

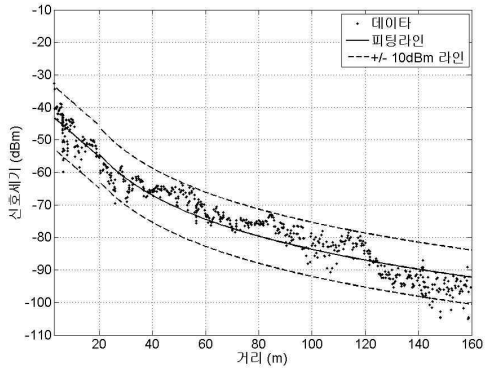


그림 2. 측정된 데이터의 피팅 라인
Fig. 2. Fitting lines of measured data.

이용하여 수학적 모델링을 하였다. 그림 2에서 실선은 실제로 측정한 신호 세기 데이터들의 피팅 라인(fitting line)이고, 점선은 ± 10dBm의 한계를 나타낸다.

본 논문연구의 충돌 방지 제어시스템에서는 20m를 '위험 주의' 거리로, 10m를 '위험 경고' 거리로 각각 사용하였다. 따라서 측정된 데이터를 기반으로 보다 정확한 모델링을 하기 위하여 거리 D를 $D > 20m$와 $D < 20m$ 두 구간으로 나누었다. 측정된 데이터를 기반으로 수신 신호 세기와 무선 장비들 사이의 거리의 관계는 아래의 식으로 모델링된다.

- 거리 $D > 20m$인 경우,

$$\text{신호 세기(dBm)} = 10\log(1/D^n),\ \text{n} = 4.18, \tag{3}$$
(STD = 4.16 dBm, 80% 이상 데이터 포함)

- 거리 $D < 20m$ 인 경우,

$$\text{신호강도(dBm)} = -0.915D - 45.06, \tag{4}$$
(STD = 4.08 dBm, 80% 이상 데이터 포함)

여기서 3-20m 범위에 있는 측정 데이터들은 근거리 데이터로서 원거리 데이터를 모델링한 수식에 적용할 경우 오차가 크므로 선형 피팅 라인을 적용하여 모델링하였다.

무선 장비들 사이의 예측된 거리 행렬 (Distance matrix) $[D_{ij}]$는 식 (3)과 (4)에 근거하여 계산되며 아래와 같이 표시된다.

$$[D_{ij}] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdot & D_{1j} & \cdot & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \cdot & D_{2j} & \cdot & D_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ D_{i1} & D_{i2} & \cdot & D_{ij} & \cdot & D_{\in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ D_{n1} & D_{n2} & \cdot & D_{nj} & \cdot & D_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ⅳ. 위치 추정

위에서 계산된 거리 행렬을 기반으로 장비의 위치를 추정하는 데에는 그라디언트와 기하학적 삼각 추적 알고리즘을 사용할 수 있다.

1. 그라디언트 알고리즘

그라디언트 알고리즘의 기본 아이디어는 무선장비들의 위치를 추정하는 과정에서 단위 계단 그라디언트 수렴 방식을 사용하고 least mean square(LMS) 오차를 활용하는 것이다. 위치 정보를 알고 있는 무선통신장비들(#1, 2, 3)과 이동무선장비#i 사이의 거리는 식(3)과 식(4)에서 D_{1i}, D_{2i}, D_{3i}로 각각 계산된다. 반복적인 계산 알고리즘에서 이동무선장비#i의 추정된 위치의 초기 값을 $p_i = \{p_ix, p_iy\}$로 나타낸다. 기본적인 삼각법(triangulation)을 이용하면, 이동무선장비#i의 추정된 위치는 아래 3개의 원의 방정식을 만족해야 함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} (p_ix-p_1x)^2+(p_iy-p_1y)^2 &= D_{i1}^2 \\ (p_ix-p_2x)^2+(p_iy-p_2y)^2 &= D_{i2}^2 \\ (p_ix-p_3x)^2+(p_iy-p_3y)^2 &= D_{i3}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

아래의 식을 정의하여 이용하면,

$$\Delta_1 = \frac{D_{i1}^2-p_1x^2-p_1y^2}{2}$$

$$\Delta_2 = \frac{D_{i2}^2-p_2x^2-p_2y^2}{2}$$

$$\Delta_3 = \frac{D_{i3}^2-p_3x^2-p_3y^2}{2}$$

아래와 같이 $p_i = \{p_ix, p_iy\}$를 구할 수 있다.

$$p_ix = \frac{(p_3y-p_1y)(\Delta_1-\Delta_2)-(p_2y-p_1y)(\Delta_1-\Delta_3)}{(p_3y-p_1y)(p_2x-p_1x)-(p_2y-p_1y)(p_3x-p_1x)} \quad (7)$$

$$p_iy = \frac{(p_3x-p_1x)(\Delta_1-\Delta_2)-(p_2x-p_1x)(\Delta_1-\Delta_3)}{(p_3x-p_1x)(p_2y-p_1y)-(p_2x-p_1x)(p_3y-p_1y)} \quad (8)$$

장비 p_i와 p_j 사이의 추정된 거리오차 e_{ij}는 다음식과 같다.

$$e_{ij} = \frac{1}{2}\left(D_{ij}-\sqrt{(p_ix-p_jx)^2+(p_iy-p_jy)^2}\right)^2$$

이를 이용하여 전체 거리오차 E는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} E &= \sum_i\sum_j e_{ij} \\ &= \sum_i\sum_j \frac{1}{2}\left(D_{ij}-\sqrt{(p_ix-p_jx)^2+(p_iy-p_jy)^2}\right)^2 \\ &= \sum_i\sum_j \frac{1}{2}(D_{ij}-Q_{ij})^2 \end{aligned}$$

여기서,

$$Q_{ij} = \sqrt{(p_ix-p_jx)^2+(p_iy-p_jy)^2}\ .$$

전체 거리오차의 그라디언트는 아래의 식으로 표현된다.

$$dp_ix = \frac{\partial E}{\partial p_ix}$$

$$dp_iy = \frac{\partial E}{\partial p_iy}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial p_ix} &= -\sum_j (D_{ij}-Q_{ij})\frac{\partial Q_{ij}}{\partial p_ix} \\ &= -\sum_j (D_{ij}-Q_{ij})\frac{p_ix-p_jx}{Q_{ij}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial p_iy} &= -\sum_j (D_{ij}-Q_{ij})\frac{\partial Q_{ij}}{\partial p_iy} \\ &= -\sum_j (D_{ij}-Q_{ij})\frac{p_iy-p_jy}{Q_{ij}} \end{aligned} \quad (10)$$

전체 거리오차의 그라디언트를 이용하여 위치의 추정치는 다음과 같이 갱신된다.

$$p_ix \Leftarrow p_ix+\alpha\cdot dp_ix \quad (11)$$

$$p_iy \Leftarrow p_iy+\alpha\cdot dp_iy \quad (12)$$

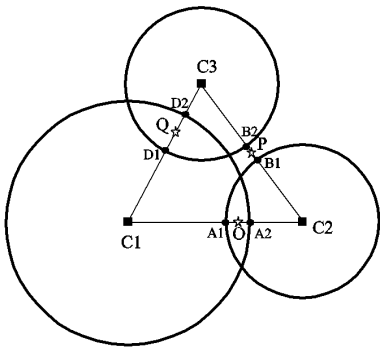
여기서 α는 미리 설정된 계단 상수 값이다.

계단 상수 α 값은 수렴의 속도를 결정하는 파라메타가 된다. 결론적으로 위치의 초기값 p_i = {p_ix, p_iy}는 식 (7)과 (8)로 계산이 되고, 추후 식 (11)과 (12)를 이용하여 갱신된다.

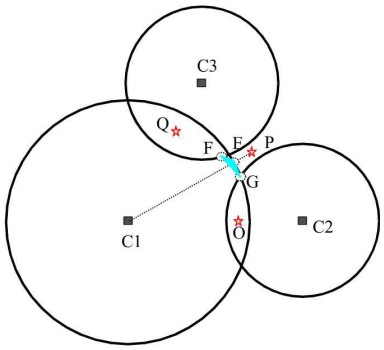
2. 기하학적 삼각 추적 알고리즘

다중 경로 페이딩 환경에서 장비의 위치를 추적하는 기하학적 삼각 추적 알고리즘의 수학적 모델을 그림 3에 도시하였다. 위치 정보를 알고 있는 무선통신장비들(#1, 2, 3)의 위치를 C1, C2, C3로 표시하고, 이동무선장비#i와의 거리를 식(3)과 식(4)에서 D_{1i}, D_{2i}, D_{3i}로 각각 계산하면, 이동무선장비#i의 가능한 위치는 중심이 C1, C2, C3에서 반지름 D_{1i}, D_{2i}, D_{3i}인 원주상에 놓이게 된다. 이론적으로 이 세 개의 원이 만나는 점이 이동무선장비#i의 위치이다.

그러나 실제 환경에서는 잡음, 다중 경로, 페이딩 현상 등의 이유로 이 원들이 한 지점에서 만나지 않을 수 있으며, 따라서 원주 상에서 유일한 등거리 지점을 찾지 못할 수도 있다. 본 논문에서 제안하는 기하학적 삼각 추적 알고리즘은 다음과 같다:



(a)



(b)

그림 3. 기하학적 삼각 추적 알고리즘
Fig. 3. Geometric triangulation algorithm.

기하학적 삼각 추적 알고리즘

(1) 식 (3)과 (4)를 이용하여 위치 정보를 알고 있는 무선통신장비들(#1, 2, 3)로부터 이동무선장비까지의 거리를 계산한 후 원을 그린다.

(2) 그림 3-(a)에서와 같이 원주 상에서 모든 교차점들(A1, A2, B1, B2, D1, D2)을 찾는다.

(3) 그림 3-(a)에서와 같이 교차점들의 인접쌍((A1, A2), (B1, B2) 및 (D1, D2))들의 중간 지점(O, P, Q)을 찾는다.

(4) 그림 3-(b)에 보인 것처럼 직선 (P, C1)과 C1의 원주와 만나는 점 E, 직선 (O, C3)과 C3의 원주와 만나는 점 F, 그리고 직선 (Q, C2)과 C2의 원주와 만나는 점 G를 찾는다.

(5) 마지막으로 E, F 및 G로 이루어진 삼각형의 중앙점을 계산한다. 이 중앙점이 이동무선장비의 예상 위치 (X, Y)가 된다.

이동무선장비의 예상 위치 (X, Y)의 유도 과정은 다음과 같다. 알고리즘의 단계 2에서 원 C1과 C2는 각각 (X_{c1}, Y_{c1})과 (X_{c2}, Y_{c2})를 중심점으로 갖는다. 교차점 A2는 원 C1의 방정식과 중심점 (X_{c2}, Y_{c2})로부터 구할 수 있다. C1에서 C2로 이어진 직선과 C1의 원주가 만나는 교차점 A2(X_{A2}, Y_{A2})는 아래의 식으로 표현된다.

$$(X_{A2}-X_{c1})^2+(Y_{A2}-Y_{c1})^2 = D_{1i}^2 \tag{13}$$

$$\frac{X_{A2}-X_{c1}}{Y_{A2}-Y_{c1}} = \frac{X_{c2}-X_{c1}}{Y_{c2}-Y_{c1}} \tag{14}$$

교차점 A2의 Y 좌표는 식 (14)에서 구할 수 있다.

$$Y_{A2} = Y_{c1}+\frac{(X_{A2}-X_{c1})(Y_{c2}-Y_{c1})}{(X_{c2}-X_{c1})} \tag{15}$$

식 (15)를 식 (13)에 대입한 후 X_{A2}와 Y_{A2}를 구하면, 교차점 A2의 좌표 (X_{A2}, Y_{A2})는 다음과 같다.

$$X_{A2} = X_{c1}\pm\sqrt{\frac{D_{1i}^2(X_{c2}-X_{c1})^2}{(X_{c2}-X_{c1})^2+(Y_{c2}-Y_{c1})^2}} \tag{16}$$

$$Y_{A2} = Y_{c1}\pm\sqrt{\frac{D_{1i}^2(Y_{c2}-Y_{c1})^2}{(X_{c2}-X_{c1})^2+(Y_{c2}-Y_{c1})^2}} \tag{17}$$

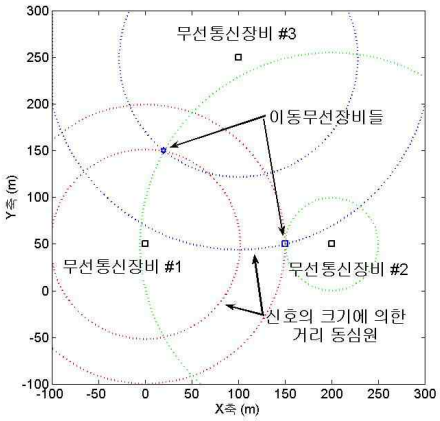


그림 4. 잡음이 없는 환경에서 이동무선장비들의 위치 추적

Fig. 4. Positioning wireless devices in the noiseless environment.

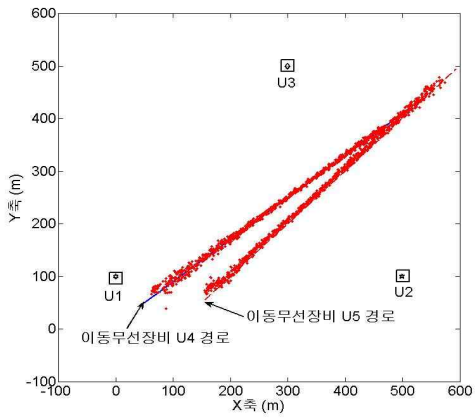


그림 5. 기하학적 삼각 추적 알고리즘을 이용한 이동무선장비의 경로 추적 시뮬레이션

Fig. 5. Simulation results of positioning wireless devices for geometric triangulation algorithm.

상기와 같은 방법을 사용하면, A1, B1, B2, D1과 D2를 각각 계산할 수 있다. 점 O, P 및 Q는 그림 3에서 보는 바와 같이 A1과 A2, B1과 B2, 그리고 D1과 D2를 연결하는 직선의 중앙점들이다. 마지막으로, 점 E, F 및 G는 식 (13)-(17)을 이용하여 차례로 계산된다.

그림 4는 잡음이 없는 이상적인 환경에서 기하학적 삼각 추적 알고리즘을 시뮬레이션한 결과로서, 3대의 무선통신장비들(#1, 2, 3)을 이용하여 2대의 이동무선장비의 위치를 성공리에 추적함을 보여 주고 있다.

V. 결 과

이동무선장비의 위치를 실시간으로 측정하기 위해 본 논문에서 제안한 그라디언트 알고리즘과 기하학적 삼각 추적 알고리즘의 성능 평가를 위하여 시뮬레이션 데이터와 실제 환경에서의 측정 데이터를 얻은 후 분석하였다.

먼저 기하학적 삼각 추적 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 그림 5와 같은 환경을 시뮬레이션 하였다. 그림 5에서 보는 것처럼 위치를 알고 있는 무선통신장비 3대(U1, U2, U3)를 약 450m 간격을 두고 삼각형 형태로 배치하고, 그 내부에서 이동무선장비 2대(U4, U5)를 이동시켜가며 기하학적 삼각 추적 알고리즘으로 위치를 추적하였다. 그림 5에서 실선은 이동무선장비들의 실제 경로를 나타낸 것이다. 전파의 다중경로와 장애물로 인하여 발생하는 감쇠 등의 페이딩 현상이 존재하는 실제 환경에서 측정한 거리에 따른 신호 세기의 데이터들은 그림 2에서 보인 것처럼 대부분 피팅 라인과 ±10dBm 오차 범위 안에서 측정된다. 따라서 시뮬레이션에서는 이동무선장비의 실제 경로 위치에 해당하는 신호의 세기에 ±10dBm의 랜덤 잡음을 인위적으로 추가하여 실제 필드에서 수신되는 신호와 유사하게 만든 후 기하학적 삼각 추적 알고리즘을 적용하였다. 시뮬레이션 결과 기하학적 삼각 추적 알고리즘으로 추적한 이동무선장비의 경로는 실제 경로와 10m 이내의 오차를 나타냄을 알 수 있었다. 또한 두 대의 이동무선장비는 서로 10m 이내로 가까워지는 지점에서 경고 메시지를 받음으로써 충돌을 회피할 수 있었다.

그라디언트 알고리즘과 기하학적 삼각 추적 알고리즘의 위치 추적 성능 평가를 위하여 실제 환경에서의 데이터를 측정하였다. 그림 6은 그라디언트 알고리즘을 사용한 위치 추적 결과이고, 그림 7은 기하학적 삼각 추적 알고리즘을 사용한 위치 추적 결과이다. 두 알고리즘의 위치 추적 성능을 비교 평가하기 위하여 다음과 같은 동일한 환경에서 이동무선장비의 위치를 추적하였다: 위치를 알고 있는 무선통신장비 3대(U1, U2, U3)를 삼각형 형태로 (장비 U1은 (0, 0), U2는 (130m, 0), U3는 (70m, 120m) 좌표에 위치) 배치한 후, 그 내부에서 이동무선장비를 이동시켜 가며 위치를 추적하였다.

그림 6에서 GPS에 의해 파악된 이동무선장비의 정확한 위치는 '+'로, 그라디언트 알고리즘에 의해 계산된 추정 위치는 '□'로 각각 표시하였다. 실험 결과 그라디언트 알고리즘의 위치 추적 최대 오차는 약 25m로 나타났다. 그라디언트 알고리즘의 위치 추적 오차는 추정

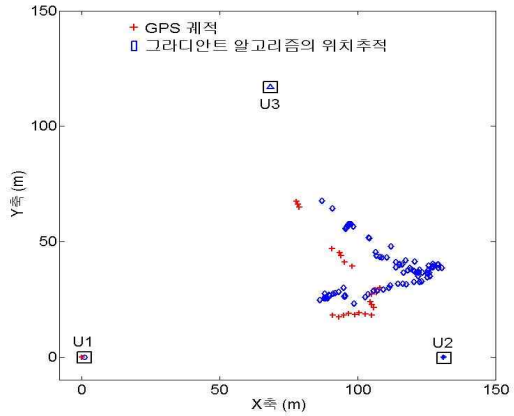


그림 6. GPS 궤적과 그라디언트 알고리즘으로 예측된 위치와의 비교

Fig. 6. Estimated locations of gradient algorithm vs. GPS location.

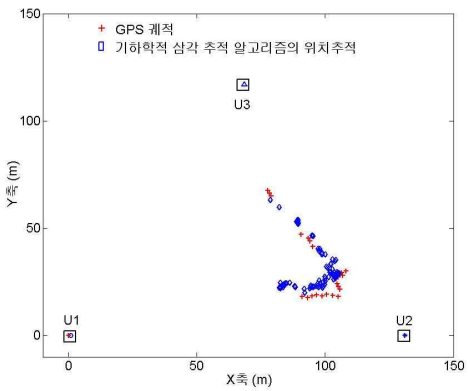


그림 7. GPS 궤적과 기하학적 삼각 추적 알고리즘으로 예측된 위치와의 비교

Fig. 7. Estimated locations of geometric triangulation algorithm vs. GPS location.

된 위치의 초기값과 계단상수 α 값에 의해 영향을 받으며, 거리 추적 오차를 줄이기 위해서는 계산량이 상당히 증가함을 알 수 있었다.

그림 7에서 GPS에 의해 파악된 이동무선장비의 정확한 위치는 '+'로, 기하학적 삼각 추적 알고리즘에 의해 계산된 추정 위치는 '□'로 각각 표시하였다. 실험 결과 기하학적 삼각 추적 알고리즘의 위치 추적 결과가 상당히 적은 오차(10m 이내)를 나타내었다. 또한 위치 추적의 궤적이 GPS 이동 궤적과 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 7에서 출발점(75m, 25m)점에서 GPS 궤적은 초기화에서 약간의 누락된 점들이 보이는 반면, 본 논문에서 제안한 기하학적 삼각 추적 알고리즘은 그렇지 않아서 데이터를 보다 더 신속히 수집하고 처리함을 알 수 있다. 또한 기하학적 삼각 추적 알고리즘은 그라디언트 알고리즘에 비하여 계산량이 상당히 적음에도 불구하고 위치 추적 성능이 더 정확함을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문연구에서는 군용 무인차량과 보병의 위치를 실시간으로 추적하여 충돌을 방지하기 위한 제어시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 보병과 군용차량에 탑재되는 무선장비의 송수신기에 방향성이 없는 모노폴 형태의 안테나를 사용하였고, 무선장비들의 위치를 추적하기 위하여 저비용의 RSS 측정값을 사용하였다. 본 논문에서는 무선통신으로 인하여 발생하는 다중경로 환경에서 장비들 위치 추적의 정확성을 향상시키기 위하여 세 단계의 수학적 평균 필터링 과정을 거쳐서 RSS 행렬 값들을 계산하였다. 또한 무선통신 환경은 유선통신 환경에 비하여 패킷의 손실이 발생할 가능성이 크기 때문에 손실된 패킷의 복구 또는 대체를 위하여 퍼지 규칙 선행 알고리즘을 개발하였다. 군용 무인차량과 보병의 충돌을 방지하기 위한 제어시스템에서는 정밀한 거리 추적이 요구되므로 실제 다양한 환경에서 측정한 거리와 신호 세기의 데이터를 이용하여 RSS 측정값과 무선장비들 사이의 거리와의 관계식을 모델링하였다.

무선장비들 사이의 거리 정보를 기반으로 무선장비의 위치를 추적하는 데에는 그라디언트 알고리즘과 기하학적 삼각 추적 알고리즘을 개발하였다. 두 알고리즘의 위치 추적 성능 평가를 위하여 시뮬레이션과 실제 환경에서의 데이터를 측정하였다. 측정 결과 기하학적 삼각 추적 알고리즘이 그리디언트 알고리즘에 비하여 계산량이 상당히 적음에도 불구하고 위치 추적 성능이 더 정확함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] H. Hashemi, "Pulse raging radio-location technique and its application to channel assignment in digital cellular radio," *IEEE Vehicle Tech. Conference*, pp. 675-680, 1991.

[2] S. Gezici, "A survey on wireless position estimation," *Springer Wireless Personal Communications*, vol. 44, no. 3, pp. 263--282, Feb. 2008.

[3] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Mobile

positioning using wireless networks: Possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 41-53, July 2005.
[4] G. L. Turin, W. S. Jewell and T. L. Johnston, "Simulation of urban vehicle-monitoring systems," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 9-16, 1972.
[5] X. Shen, J. Mark and J. Ye, "Mobile location estimation in cellular networks using fuzzy logic," *IEEE Vehicle Tech. Conf.*, pp. 2108-2114, 2000.
[6] J. Caffery, and G. Stuber, "Subscriber location in CDMA cellular networks," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 2, pp. 406-416, 1998.
[7] M. Vossiek, L. Wiebking, and etc., "Wireless local positioning," *IEEE Microwave Mag.*, vol. 4, no. 4, pp. 77-86, Dec. 2003.
[8] 임유진, 박재성, 안상현, "실내 위치 측위 시스템을 위한 기하학적 접근 기법," *대한전자공학회 논문지*, 제45권, 제12호, 1058-1065쪽, 2008년 12월.
[9] M. Hata and T. Nagatsu, "Mobile location using signal strength measurements in a cellular system," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 245-251, 1980.
[10] H. L. Song, "Automatic vehicle location in cellular communications systems," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 43, pp. 902-908, 1994.
[11] 이종훈, 김상동, 정우영, 김선미, 박용완, "실시간 실내외 측위 기술 개발 동향 분석," *대한전자공학회 텔레콤*, 제22권, 제2호, 85-95쪽, 2006년 12월.
[12] A. Janex, "Concept of a collision-avoidance system for marine navigation," *IEEE Oceans'90 Conf. Proceedings*, pp. 458-463, Sep. 1990.
[13] M. Joa-Ng, "Spread spectrum medium access protocol with collision avoidance using controlled time of arrival," *IEEE International Conf. on Communications*, pp. 408-414, June 2000.
[14] E. Panizza and G. Levizzari, "Development underway in FIAT for onboard information and collision avoidance systems," *Proceedings of International Congress on Transportation Electronics*, pp. 445-462, 1990.

저 자 소 개

남 세 현(정회원)
1985년 연세대학교 공과대학 전자공학과 학사
1987년 한국과학기술원 전기및 전자공학과 석사
1991년 한국과학기술원 전기및 전자공학과 박사
1991년～현재 대구대학교 정보통신공학부 교수
<주관심분야 : 컴퓨터통신, 통신시스템, RFID>

정 유 정(정회원)
1990년 인하대학교 공과대학 전기공학과 학사
1994년 University of Nevada 전자공학과 석사
1999년 University of Nevada 전자공학과 박사
2004년～현재 대구대학교 정보통신공학부 교수
<주관심분야 : RFID, 유전자 알고리즘을 이용한 안테나 최적화, 다중밴드 안테나 최적화>