

실내외에서 물류 차량의 TDOA 기반 위치 추적 알고리즘

강희원*, 황동환**

충남대학교 전자공학과*, 충남대학교 전기정보통신공학부**

TDOA Based Position Tracking Algorithm for Logistic Vehicles

Hee Won Kang*, Dong-Hwan Hwang**

*Department of Electronics Engineering, Chungnam National University,

**School of Electrical and Computer Engineering, Chungnam National University

Abstract - 본 논문에서는 실시간으로 물류를 운반하는 차량의 위치 추적을 위한 TDOA 기반의 알고리즘을 다루고 있다. Taylor-Series 방법과 QCLS 방법에 대한 모의실험을 수행하였으며, 이를 통해 RTLS에서 물류 관리를 위한 위치 추적 알고리즘으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

산업이 점차 고도화되면서 물류량이 증가함에 따라 중요 물자의 보관 및 수송이 빈번해지고 그에 따른 보안 관리에 대한 관심이 높아지고 있다. 물류 단지 및 공장 등의 산업시설에서 보안 혹은 효율적인 물류 관리를 위해 물류 차량의 경로 및 위치를 파악할 필요가 있다. 이러한 환경에서 실시간으로 물류의 처리 및 관리되어야하므로, 실시간으로 위치 추적할 수 있는 시스템인 RTLS(Real Time Locating System)가 필요하다.

일반적으로 RTLS는 항체에 탑재하는 태그, 측정치를 얻기 위한 리더, 신호 정보를 기록하고 위치를 계산하는 엔진으로 구성된다[1]. 위치 추적을 위해 사용하는 기법에는 신호의 도달 각도를 이용하는 AOA(Angel Of Arrival), 신호의 세기를 이용하는 RSSI(Received signal strength indication), 신호의 전파 도달 시간을 이용하는 TOA(Time Of Arrival)와 신호의 전파 도달 시간의 차이를 이용하는 TDOA(Time Difference Of Arrival) 등이 있다.

TDOA 기법은 신호의 전달 시간 차이를 이용하기 때문에 신호의 수신빈 리더들 간의 시각동기만 이루어져도 된다. 본 논문에서는 시각동기가 리더들끼리만 이루어져도 되므로 RTLS에서 효과적으로 이용할 수 있다고 알려져 있다.

본 논문에서는 실내외의 물류 차량의 위치 추적을 위한 TDOA 기반의 알고리즘에 대한 성능을 살펴보고자한다. 두 가지 알고리즘을 살펴본 있는데 하나는 비선형식을 선형식으로 바꿔 주는 Taylor-series방법이고 [2], 다른 하나는 직접 해를 구하는 QCLS(Quadratic Correction Least Square) 방법이다[3]. 직접 해를 구하는 방법으로는 SX(Spherical intersection)[4], SI(spherical Interpolation)[4], Fang[5] 방법 등이 있다. 이들 중 QCLS 방법이 다른 방법들에 비해 정확도가 높은 것으로 알려져 있다[3].

2절에서는 TDOA 기반의 위치 추정 알고리즘의 두 가지 알고리즘에 대해 기술하였고, 3절에서는 두 가지 알고리즘에 대한 모의실험 결과를 제시한다. 마지막으로 4절에서는 결론과 추후 연구 과제를 제시하였다.

2. TDOA 기반의 위치 추적 알고리즘

2.1 TDOA

임의의 두 개의 리더의 태그로부터 도달시간 차이는 거리 차로 환산할 수 있으며 이는 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$r_{i,j} = c[(t_i - t_r) - (t_j - t_r)] = c(t_i - t_j) \quad (1)$$

여기서, c 는 빛의 속도이고, t_r 는 태그가 신호를 송신한 시간이고, t_i 는 i 번째 리더가 신호를 수신한 시간이고, t_j 는 j 번째 리더가 신호를 수신한 시간이다. 또한, 임의의 두 개 리더와 태그 사이의 거리 차이는 식(2)로 표현할 수 있다.

$$r_{i,j} = r_i - r_j = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \quad (2)$$

여기서, r_i 는 i 번째 리더와 태그 간의 거리이고, r_j 는 j 번째 리더와 태그 간의 거리이고, (x, y, z) 는 태그의 좌표이고, (x_i, y_i, z_i) 는 i 번째 리더

의 좌표이고, (x_j, y_j, z_j) 는 j 번째 리더의 좌표이다.

2.1.1 Taylor-Series 방법

Taylor-Series 방법은 식(2)를 선형화하여 위치를 계산하는 알고리즘이다. 식 (2)를 f_a 라 두고, 이것과 측정치와의 관계를 나타내면 식(3)과 같다.

$$f_a(x, y, z, x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j) = (m_{i,j})_a - e_a \quad (3)$$

여기서, $(m_{i,j})_a$ 는 측정치이고, e_a 는 측정오차이다.

태그의 위치에 대한 초기치를 x_v, y_v, z_v 라 한다면, 실제 위치는 식(4)와 같이 표현할 수 있다. 이를 이용하여 2차항 이하의 Taylor-series로 정리하면 식(5)와 같다.

$$x = x_v + \delta_x, y = y_v + \delta_y, z = z_v + \delta_z \quad (4)$$

$$f_a = f_{av} + \frac{\partial f_{av}}{\partial x_v} \delta_x + \frac{\partial f_{av}}{\partial y_v} \delta_y + \frac{\partial f_{av}}{\partial z_v} \delta_z \quad (5)$$

여기서, f_{av} 는 $f_a(x_v, y_v, z_v, x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j)$ 이다. 식(5)를 정리하여 행렬식으로 표현하면 식(6)과 같고, 최소자승해인 식(7) 통해 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m_{i,j})_1 - f_{1v} \\ (m_{i,j})_2 - f_{2v} \\ \vdots \\ (m_{i,j})_{(N-1)} - f_{(N-1)v} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{(N-1)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[\delta_x \ \delta_y \ \delta_z]^T = [C^T Q^{-1} C]^{-1} C^T Q^{-1} H \quad (7)$$

$$\text{여기서, } C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{(N-1)1} & c_{(N-1)2} & c_{(N-1)3} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} (m_{i,j})_1 - f_{1v} \\ (m_{i,j})_2 - f_{2v} \\ \vdots \\ (m_{i,j})_{(N-1)} - f_{(N-1)v} \end{bmatrix}$$

Q 는 노이즈 공분산 행렬이다. 그리고 N 은 리더의 개수이다.

이 방법은 초기 추정치가 필요하며, 발산하지 않도록 결정하여야 한다.

2.1.2 QCLS 방법

식(2)의 우변의 r_j 를 이항하고 양변을 제곱한 후, j 번째 리더를 원점의 좌표를 가지는 기준 리더(1번째 리더)로 두고 정리하면 식(8)과 같이 된다.

$$r_i^2 = s + K_i - 2x_i x - 2y_i y - 2z_i z \quad (8)$$

아래 식(9)는 식(8)을 전개하고 정리한 결과를 행렬식($\mathbf{h}_1 = \mathbf{G}_1 \mathbf{u}_1$)으로 나타낸 것이다.

$$\begin{bmatrix} r_{2,1}^2 - K_2 \\ r_{3,1}^2 - K_3 \\ \vdots \\ r_{N,1}^2 - K_N \end{bmatrix} = -2 \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 & r_{2,1} \\ x_3 & y_3 & z_3 & r_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & z_N & r_{N,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ r_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, $s = x^2 + y^2 + z^2$ 이고, $K_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$ 이다.

이 방법에서는 아래에 서술한 바와 같이 두 단계로 위치를 구한다. 첫

번째 단계는 식(10)과 같이 가중치 행렬 W_1 를 사용하여 식(11)로부터 가중최소자승해 u_1 을 구한다.

$$W_1 = \frac{1}{4c^2} B_1^{-1} Q^{-1} B_1^{-1} \quad (10)$$

$$u_1 = (G_1^T W_1 G_1)^{-1} G_1^T W_1 h_1 \quad (11)$$

여기서, Q 는 TDOA 측정 잡음 행렬의 공분산 행렬이다. W_1 을 구하기 위해서는 B_1 을 알아야하는데, 이는 대략적인 태그의 초기 추정치를 식(12)로부터 구한 후 계산할 수 있다. B_1 은 리더와 태그 간의 거리에 대한 대각행렬($diag\{r_2, r_3, \dots, r_N\}$)이다.

$$u_1 = (G_1 Q^{-1} G_1)^{-1} G_1^T Q^{-1} h_1 \quad (12)$$

두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 구한 u_1 을 보다 정확한 해를 구하기 위한 과정이며, 식(11)에서 구한 u_1 의 각 성분을 제공하여 다음 식(13)과 같은 오차 식을 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_2 = h_2 - G_2 u_2 = \begin{bmatrix} u_1(1)^2 \\ u_1(2)^2 \\ u_1(3)^2 \\ u_1(4)^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \\ z^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$B = diag\{u_1(1), u_1(2), u_1(3), u_1(4)\}$ 일 때, 가중치 행렬 W_2 를 이용하여 식(14)로부터 가중최소자승해 u_2 를 구할 수 있다.

$$u_2 = (G_2^T W_2 G_2)^{-1} G_2^T W_2 h_2 \quad (14)$$

$$W_2 = \frac{1}{4} B_2^{-1} G_1^T W_1^{-1} G_1 B_2^{-1} \quad (15)$$

따라서 최종 위치는 u_2 로부터 다음 식(16)과 같이 계산한다.

$$z_p = \begin{bmatrix} \sqrt{u_2(1)} \\ \sqrt{u_2(2)} \\ \sqrt{u_2(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (16)$$

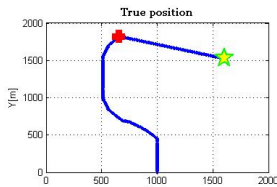
3. 성능 검증

전절에서 소개한 두 가지 알고리즘의 성능 분석을 위하여 MATLAB을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1 모의실험 환경

리더의 배치는 (0,0,20), (1000,0,20), (1000,2000,20), (2000,0,20), (0,1000,20), (0,2000,20), (2000,1000,20), (2000,2000,20)의 정사각형 형태로 8개를 배치하였고, 단위는 [m]이다. 기준 리더의 위치는 (0,0,20)로 한다. 태그의 움직임은 이 범위 내에서 물류 차량은 움직인다고 가정한다.

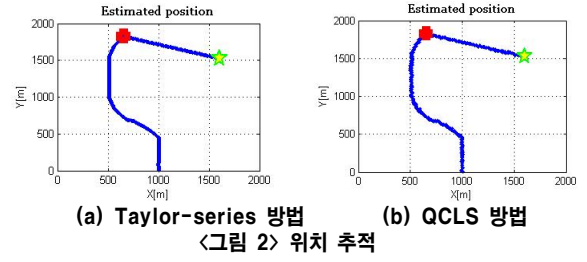
신호 생성 시 신호에 포함되는 노이즈는 15[m]의 정규분포로 두었다. 이는 각 리더에서의 시각 오차로 알려진 17[ns]를 거리로 환산한 것이다. 그림 1은 2[km]×2[km]로 설정한 공간에서 물류 차량의 움직임을 나타내었으며, 이는 물류를 운반할 때 차량의 움직임을 고려하여 입구에서 네모 지점에 도착하였다가 최종 목표 지점인 별 지점까지의 움직인 것이다.



<그림 1> 물류 차량 궤적

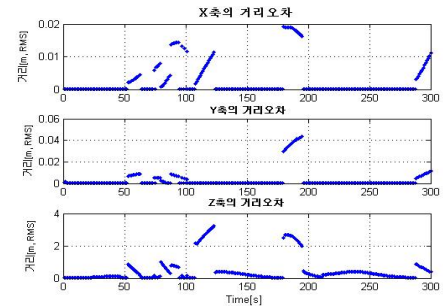
3.2 모의실험 결과

모의실험은 몬테카를로(Monte-carlo)방식으로 100회를 수행하였으며, 물류 차량의 속도는 36km/h로 하였고, 시뮬레이션 시간은 300초이다. 그림 2는 Taylor-Series 방법과 QCLS 방법을 이용한 알고리즘에 대한 위치 추적 결과 궤적을 나타낸다.

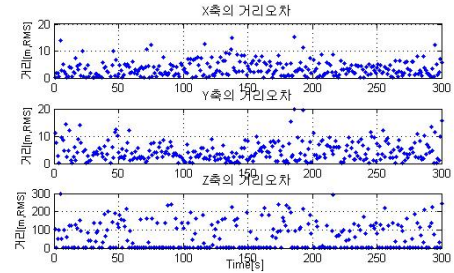


<그림 2> 위치 추적

그림 3은 두 알고리즘의 위치 추적 오차를 RMS로 나타낸 것이다. Taylor-Series 방법을 이용하여 위치 추적을 하였을 때가 QCLS 방법을 이용하였을 때보다 위치 추적 오차가 작은 것을 확인할 수 있다. 반면, Z축의 거리 오차 값이 X, Y축의 거리오차보다 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다.



(a) Taylor-series 방법



(b) QCLS방법

<그림 3> 위치 추적 오차

4. 결론 및 추후 연구 과제

본 논문에서는 물류 차량의 TDOA 기반 위치 추적 알고리즘으로 Taylor-Series 방법과 QCLS 방법을 소개하고 모의실험을 통해 성능을 살펴보았다. 결과로부터, Taylor-Series 방법을 이용하여 위치 추적을 하였을 때가 QCLS 방법을 이용하였을 때보다 위치 추적의 정확도가 더 높은 것을 알 수 있었다. 두 경우 모두 Z축의 거리오차가 X, Y축의 거리오차보다 상대적으로 큰 것을 확인하였다.

추후에 Z축의 거리오차가 큰 것을 보정하기 위해 리더의 배치와 위치 추적 오차와의 관계 도출할 것이며, 본 논문의 결과와 함께 실 환경에 적용할 예정이다.

[참고 문헌]

- [1] ISO/IEC 24730-1/2, Information Technology - Real-time locating systems (RTLS)
- [2] Wade H. Foy, "Position-location solution by Taylor-series estimation", *IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems*, pp. 187-194, vol. 12, March 1976.
- [3] Y.T. Chan and K. C. Ho, "An efficient closed-form Localization solution from time difference of arrival measurements", *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 393-396, vol 3. 1994.
- [4] Julius O. smith and Jonathan S. abel, "Closed-Form Least-Squares Source location Estimation from Range-Difference Measurements", *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, no.12, vel.35, pp. 1661-1669, Dec. 1987.
- [5] Bertrand T. Fang, "Simple Solution for Hyperbolic and Related Position Fixes", *IEEE Transactions Aerospace and Electronic Systems*, vol. 26. Sep. 1990.