

무인운반체계에서 운반차들의 충돌회피를 위한 한가지 방법

한대혁, 지철

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《인민경제의 현대화, 정보화실현의 전략적목표는 모든 생산공정을 자동화, 지능화하고 공장, 기업소들을 무인화하는것입니다.》

무인운반체계는 원료 및 자재를 비롯한 짐운반을 자동적으로 진행하는 자동운수체계로서 생산공정의 현대화, 무인화실현에서 중요한 몫을 맡고있다.

무인운반체계에서 운반차들의 운반경로는 일반적으로 고정된 운반경로형태나 혹은 운반차의 자동경로탐색기능에 의한 개방식운반경로방식으로 설계한다.

무인운반체계설계에서 중요한 문제의 하나는 운반차들이 공동으로 리용하는 궤도선들에 대한 리용우선권을 결정하는것이며 이를 위해서는 운반차들사이에 발생할수 있는 충돌을 미연에 방지하도록 조종하는것이다.

선행연구[1]에서는 무인운반체계를 여러개의 구역들로 나누고 운반차들의 완충구역을 형성함으로써 운반차들사이의 충돌을 방지하는 구역조종기를 설계하였다.

그러나 이러한 방법은 충돌지점이 고정되어있는 대상에만 적용할수 있다.

선행연구[2]에서는 무인운반차의 주행일정계획을 작성하여 운반과제처리과정에 발생할수 있는 충돌을 미리 방지하도록 하였는데 운반과제가 많고 체계구조가 복잡한 대상에는 적합하지 못하였다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 논문에서는 매 운반차를 상태공간모형으로 모형화하고 희망하는 조종성능을 보장하기 위한 조종법칙을 결정하고 충돌회피를 위한 조종기를 설계하였다.

1. 무인운반차의 수학적모형화

체계의 상태공간모형을 작성하기 위하여 다음과 같은 가정을 진행한다.

- ① 무인운반차들은 질점으로 본다.
 - ② 운반차의 방향은 한방향이다.
 - ③ 운반차들의 속도는 측정할수 있으며 상위조종기에 의하여 속도가 조절될수 있다.
 - ④ 운반차들사이에 정보교환을 위한 통신이 존재하지 않으므로 어떤 임의의 운반차의 동작은 기타 다른 운반차들에 대하여 외란으로 된다고 가정한다.
- 운반차의 속도에 관하여 다음과 같은 제한을 준다.

$$\dot{x}_A \in [v_{\min}^A, v_{\max}^A]$$

$$\ddot{x}_A \in [a_{\min}^A, a_{\max}^A]$$

$$\dot{x}_B \in [v_{\min}^B, v_{\max}^B]$$

\ddot{x}_A 를 조종 $u(t)$, \ddot{x}_B 를 외란 $d(t)$ 라고 하면 위의 제한은 다음과 같이 서술할수 있다.

$$u(t) \in [a_{\min}^A, a_{\max}^A]$$

$$d(t) \in [d_{\min}, d_{\max}]$$

우와 같은 제한에 기초하여

$$v_{\min}^A = v_{\min}^B = 0$$

일 때 상태공간모형을 다음과 같이 작성할 수 있다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{x}_A + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{x}_B = Ax + Bu + Dd \quad (1)$$

여기서

$$x = \begin{bmatrix} x_A \\ \dot{x}_A \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \in R$$

이고 $\tau = x_B - x_A$, R 는 두 운반차들사이의 거리모임이다.

식 (1)로부터 x , u , d 에서 립쉬츠연속인 함수에 대하여

$$\dot{x} = f(x, u, d)$$

를 얻어낼 수 있다.

여기로부터 초기상태를 $x(0) = x^0$ 으로 주었을 때 운반차들사이의 충돌을 회피하기 위한 조종력을 다음과 같이 구한다.

체계에서 운반차 A 와 운반차 B 는 어떤 다른 장애물과 충돌하지 않으며 어느 운반차도 주행시에 정지하지 않는다고 가정한다. 즉 $v_{\min}^A > 0$ 과 $v_{\min}^B > 0$ 이다.

따라서 운반차들사이의 충돌을 방지하기 위한 상태공간모형은 다음과 같다.

$$x(t) = e^{At} x_0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)} Bu(\tau) d\tau + \int_0^t e^{A(t-\tau)} D \dot{x}_B(\tau) d\tau \quad (2)$$

여기서

$$e^{At} = \begin{bmatrix} 1 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

이므로

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1^0 + tx_2^0 \\ x_2^0 \\ -tx_2^0 + x_3^0 \end{bmatrix} + \int_0^t \begin{bmatrix} t-\tau \\ 1 \\ -(t-\tau) \end{bmatrix} u(\tau) d\tau + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{x}_B(\tau) d\tau \quad (3)$$

로 된다.

2. 조종기설계와 결과분석

우선 초기상태값 x^0 , 조종력 u , 외란 d 가 작용할 때 체계의 조종목적을 달성하기 위한 목적함수는 다음과 같이 정의한다.

$$J(x^0, u, d) = |x(T)| > C \quad (4)$$

여기서 T 는 운반차 A 가 충돌지점에 도달하는 시간이다.

이로부터 목적함수를 만족시키는 (u_1^*, d_1^*) 과 (u_2^*, d_2^*) 에 대하여 고찰한다.

우선 (u_1^*, d_1^*) 에 대한 조종력을 구한다.

$$u_1^* = \begin{cases} a_{\min}, & t \leq T_{11} \wedge x_A \neq 0 \\ 0, & T_{11} < t < T_{31} \end{cases}$$

$$d_1^* = d_{\min}, \quad t \leq T_{21}$$

웃식에서 T_{11} 은 운반차 A 가 a_{\min} 하에서 최소속도에 도달하는데 걸리는 시간이며 T_{31} 은 충돌지점에 도달하는 전체 시간, T_{21} 은 운반차 B 가 d_{\min} 하에서 충돌지점에 도달하는데 걸리는 시간으로서 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{cases} T_{11} = \frac{v_{\min}^A - x_2^0}{a_{\min}} \\ T_{21} = \frac{x_B^0}{\dot{x}_{\min}^B} = \frac{x_B^0}{d_{\min}} \\ T_{31} = T_{11} - \frac{x_A(T_{11})}{v_{\min}^A} \end{cases}$$

(u_1^*, d_1^*) 이 최량풀이라는것을 증명하기 위하여 운반차들의 조종력을 변화시킨다.
이때

$$x^*(t) = [0 \quad -t \quad 1]x^0 - \int_0^t (t-\tau)u_1^*(\tau)d\tau + \int_0^t d_1^*(\tau)d\tau$$

이고 상태는 (u_1^*, d_1^*) 에서 $x_3(t)$ 로 되게 한다.

그러면

$$\begin{aligned} x^*(t) &= [0 \quad -t \quad 1]x^0 - \int_0^t (t-\tau)u_1(\tau)d\tau + \int_0^t d_1^*(\tau)d\tau \Rightarrow \\ &\Rightarrow x(t) - x^*(t) = \int_0^t (t-\tau)(u_1^*(\tau) - u_1(\tau))d\tau \end{aligned}$$

이다.

한편

$$u_1(\tau) \geq u_1^*(\tau)$$

에서

$$x(t) - x^*(t) \leq 0$$

$$J(x^0, u_1, d_1^*) \leq J(x^0, u_1^*, d_1^*)$$

로 된다.

다음 외란을 변화시키면 (u_1^*, d_1) 에서

$$\begin{aligned}
x(t) &= [0 \quad -t \quad 1]x_0 - \int_0^t (t-\tau)u_1^*(\tau)d\tau + \int_0^t d_1(\tau)d\tau \Rightarrow \\
&\Rightarrow x(t) - x^*(t) = \int_0^t (d_1(\tau) - d_1^*(\tau))d\tau \Rightarrow \\
&\Rightarrow x(t) - x^*(t) = \int_0^t (\dot{x}_B(\tau) - \dot{x}_B^*(\tau))d\tau
\end{aligned}$$

이다.

따라서 (u_1, d_1) 의 모든 값들에 대하여

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_B(\tau) &\geq \dot{x}_B^*(\tau) \\ x(t) - x^*(t) &\geq 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow J(x^0, u_1^*, d_1) \geq J(x^0, u_1, d_1^*)$$

을 만족시킨다.

그러므로

$$J(x^0, u_1^*, d_1^*) \leq J(x^0, u_1, d_1^*) \leq J(x^0, u_1^*, d_1)$$

이다.

따라서 (u_1^*, d_1^*) 이 최량풀이라는것을 알수 있다.

(u_2^*, d_2^*) 에 대하여 우와 같은 방법으로 조종력을 구한다.

$$u_2^* = \begin{cases} a_{\max}, & t \leq T_{12} \wedge x_A \neq 0 \\ 0, & T_{12} < t < T_{32} \end{cases}$$

$$d_2^* = d_{\max}, \quad t \leq T_{22}$$

웃식에서 T_{12} 는 운반차 A가 a_{\max} 하에서 최대속도에 도달하는데 걸리는 시간이며 T_{32} 는 충돌지점에 도달하는 전체 시간, T_{22} 는 운반차 B가 d_{\max} 하에서 충돌지점에 도달하는데 걸리는 시간으로서 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{cases} T_{12} = \frac{v_{\max}^A - x_2^0}{a_{\max}} \\ T_{22} = \frac{x_B^0}{\dot{x}_{\max}^B} = \frac{x_B^0}{d_{\max}} \\ T_{32} = T_{12} - \frac{x_A(T_{12})}{v_{\max}^A} \end{cases} \quad (5)$$

한편 (u_2, d_2) 의 모든 값들에 대하여

$$J(x^0, u_2, d_2^*) \geq J(x^0, u_2, d_2) \geq J(x^0, u_2^*, d_2)$$

로 된다는것을 증명할수 있다.

따라서 (u_1^*, d_1^*) 과 (u_2^*, d_2^*) 은 목적함수를 만족시키는 최량풀이로 된다.

운반차들의 속도대역이 0.5~2m/s 이고 두 운반차들사이의 최소거리가 0.75m라고 할 때 제안된 조종기의 조종력에 대한 실험결과값은 표와 같다.

표. 충돌방지를 위한 운반차조종력계산결과

충돌지점에서 운반차 A까지의 거리/m	충돌지점에서 운반차 B까지의 거리/m	$a_A^0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ $a_B^0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	조종된 거리/m	
			운반차 A	운반차 B
5	4	0.6	0.94	3.42
		1.5	0.44	2.75
5	6	1.8	1.06	1.42
		1.2	1.56	0.75
5	7	0.75	2.06	0.42
		1.25	2.56	0.25

맺는 말

무인운반체계에서 무인운반차의 상태공간모형을 얻어내고 그로부터 운반차들사이의 충돌을 방지하기 위한 조종기를 설계하는 한가지 방법을 제안하였다.

참고 문헌

- [1] K. Zheng et al.; Production Engineering, 7, 4, 392, 2013.
- [2] Wan Xu et al.; The International Journal of Performability Engineering, 13, 8, 1347, 2017.

주체108(2019)년 11월 5일 원고접수

A Method for the Collision Avoidance among Vehicles at AGVS

Han Tae Hyok, Ji Chol

We proposed a way to get state-space model of AGV and described how to design a controller avoiding collision between AGVs.

Keyword: AGVS(automated guided vehicle system)