

분산 수동속도장 제어법을 이용한 다중 AGV 시스템의 협조 이송제어

論 文
55D-6-2

A Cooperative Object-Transportation Control of Multiple AGV Systems using Decentralized Passive Velocity Field Control Algorithm

徐振瑚[†] · 金英福^{*} · 李權純^{**}
(Jin-Ho Suh · Young-Bok Kim · Kwon-Soon Lee)

Abstract - Automatic guided vehicle(AGV) in the factory has an important role to advance the flexible manufacturing system. In this paper, we propose a novel object-transportation control algorithm of cooperative AGV systems to apply decentralized control scheme based on virtual-passivity. It is shown that the cooperative AGV systems ensure stability and the convergence to scaled multiple of each desired velocity field for multiple AGV systems. Finally, the application of proposed virtual passivity-based decentralized control algorithm via system augmentation is applied to be the tracking a circle. Also, the simulation results for the object-transportation by two AGV systems illustrate the validity of the proposed control scheme.

Key Words : Automated Guided Vehicle(AGV), Decentralize Control, Passive Velocity Field Control, Cooperative Control

1. 서 론

AGV는 현재 항만 및 공장 자동화 분야에서 고중량의 물건들을 이송하는 작업의 중요한 요소로써 이용되어지고 있다. 따라서 이러한 화물들의 이송 및 운송을 위한 여러 가지 종류의 산업로봇 시스템들이 개발되어지고 있다. 여기에서, 우리는 다중 이송시스템들의 상호협력력을 통하여 한 대의 이송 시스템이 실행할 수 없는 여러 가지 작업들을 수행하기 위한 연구를 진행하고자 하며, 특히 소형의 AGV 시스템으로써 크고 무거운 화물들을 선택적으로 이송하기 위한 제어 알고리즘을 제안하고자 한다. 그러므로 이러한 연구결과는 고하중의 이송 시스템들을 운송하기 위한 한 가지의 연구방법으로써 새로운 개념을 운송연구에 공헌할 수 있을 것으로 생각한다. 특히, 전통적인 이송시스템 관련 연구는 작업 공간 내에서 시간에 따라 궤도를 추종하는 개념이었지만, 현재 많은 작업들이 시간보다는 시스템의 상태에 의하여 지정되어진 목표 운동으로써 이루어지며 이러한 예제들로는 궤도추종(Contour following), 벽면 페인팅, 로봇과 인간의 상호작용 등이 있다. [1]

본 논문에서는, Li [1]에 의하여 제안되어졌던 수동속도장 제어 알고리즘을 이용하여 다중 AGV 시스템에 의한 상호작용으로 물체를 이송하기 위한 분산제어 알고리즘을 제안하고자 하며, 제안되어진 알고리즘은 가상 시스템의 도입을 통한 분산제어 알고리즘으로써 단일 시스템이 아닌 다중 시스템의

상호협력력을 고려한 분산제어 알고리즘임에 유의해야 할 것이다. 또한 제안되어진 제어 알고리즘을 이용함으로써 외란이 가해질 경우에도 항상 수동(Passive)임을 보여줌으로써 시스템의 안정성(Stability)을 보증한다.

2. 다중 AGV 시스템

본 논문에서 고려되어진 협조 이송제어를 위한 다중 AGV 시스템은 그림 1과 같이 구성되어지고, 각각의 AGV 시스템은 두 개의 독립적 바퀴 및 조향을 보조하는 캐스터(Caster)로 이루어져 있다.

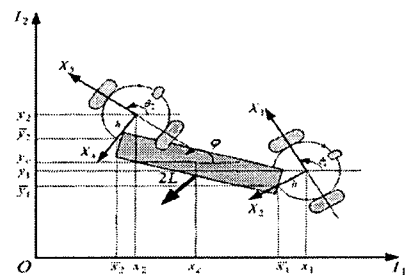


그림 1. 협조 물체 이송 AGV 시스템의 개략도
Fig. 1 Schematic configuration of cooperative object-transportation AGV systems

만약 이송물체의 중량과 관성모멘트를 각각 m 과 I_0 라고 할 때, AGV에 의하여 운반되어지는 이송 시스템의 동적 방정식은 다음과 같이 간단히 기술되어진다.

$$M_o \ddot{x}_o = 0, I_0 \ddot{\psi} = 0 \quad (1)$$

여기서, $x_o = (x_c, y_c)^T$ 이고 $M_o = \text{diag}(m, m)$ 이다. 더구나, 두 대의 AGV 시스템들에 대한 동적 방정식은 각 AGV 시스템

[†] 교신저자, 正會員 : (재)포항지능로봇연구소 선임연구원 · 工博

E-mail : suhgang@piro.re.kr

^{*} 正會員 : 釜慶大學校 機械工學部 助教授 · 工博

^{**} 正會員 : 東亞大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2006年 3月 20日

最終完了 : 2006年 4月 17日

의 모델 방정식을 확장하여 다음과 같이 간단히 나타내어질 수 있다.

$$H^*(\beta)\dot{\eta}(t) + F^*(\beta, \eta) = G^*(\beta)u(t) \quad (2)$$

여기서,

$$H^* = \begin{pmatrix} H_1(\beta_1) & 0 \\ 0 & H_2(\beta_2) \end{pmatrix}, G^* = \begin{pmatrix} G_1(\beta_1) & 0 \\ 0 & G_2(\beta_2) \end{pmatrix}$$

$$\eta(t) = (\eta_1 \ \eta_2)^T, u(t) = (\tau_{m1} \ \tau_{m2})^T$$

따라서, 식(1)과 식(2)을 이용함으로써 수동 관절(Passive joint)들에 의한 구속(Constraint) 없는 시스템 전체의 동적 방정식은 다음과 같이 표현되어진다.

$$M_w \ddot{x}_w + F_w = G_w u \quad (3)$$

여기서,

$$M_w = \text{diag}(H^*(\beta), M_o, I_o), F_w = (F^* \ 0 \ 0)^T$$

$$\dot{x}_w = (\eta(t), \dot{x}_o(t), \dot{\psi}(t))^T, G_w = (G^*, 0, 0)^T$$

또한 수동 관절들에 의한 기계적 구속으로부터, 일반적인 좌표들의 홀로노믹 구속은 다음과 같이 정의되어진다.

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{y}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 - h \sin \theta_1 \\ y_1 + h \cos \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_c - L \cos \psi \\ y_c + L \sin \psi \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_2 \\ \bar{y}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 - h \sin \theta_2 \\ y_2 + h \cos \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_c + L \cos \psi \\ y_c - L \sin \psi \end{pmatrix} \quad (5)$$

그러므로, 전체 시스템에 대한 실제 동적 방정식은 다음과 같이 표현되어진다.

$$M_w \ddot{x}_w + F_w = G_w u - J_w^T \lambda \quad (6)$$

여기서, λ 는 구속력 벡터이고 다음과 같이 정의되어진다.

$$\lambda = (\lambda_1 \ \lambda_2)^T, \lambda_1 = (\lambda_{m1} \ \lambda_{m2})^T, \lambda_2 = (\lambda_{m3} \ \lambda_{m4})^T \quad (7)$$

따라서, 식(7)과 같이 구속력으로 정의하면, 전체 시스템의 실제 동적 방정식은 식(6)을 이용함으로써 다음과 같이 합성되어질 수 있다.

$$H_i(\beta_i)\dot{\eta}(t) + f_i(\beta_i, \eta_i) = G_i(\beta_i)\tau_{mi} - J_i^T \lambda_i \quad (8)$$

$$M_o \ddot{x}_o = -J_o^T \lambda \quad (9)$$

$$I_o \ddot{\psi} = -J_\psi^T \lambda \quad (10)$$

우리가 구속력 λ_i 가 각각의 Force 센서에 의하여 측정되어진다고 가정함으로써, 다음과 같은 로컬 제어입력(Local control input)을 정의할 수 있다.

$$\tau_{mi} = G_i^{-1}(H_i \nu_i + f_i + J_i^T \lambda_i) - G_i^{-1} H_i J_i^T \lambda_i \quad (11)$$

만약에 다중 AGV 시스템으로부터 제어입력 ν_i 을 제어할 수 있다고 한다면, 우리는 식(11)을 식(8)에 대입함으로써 페루프 시스템을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\dot{\eta}_i(t) = \nu_i(t) - J_i^T \lambda_i \quad (i=1,2) \quad (12)$$

이러한 앞의 방정식들을 정리함으로써, 전체 시스템에 대한 실제 동적방정식은 다음과 같은 행렬형식으로 표현되어진다.

$$\overline{M}_w \ddot{x}_w = \overline{G}_w \nu(t) - J_w^T \lambda \quad (13)$$

여기서,

$$\overline{M}_w = \text{diag}(I_{2 \times 2}, I_{2 \times 2}, M_o, I_o), \nu = (\nu_1, \nu_2, 0_{2 \times 1}, 0)^T$$

$$\overline{G}_w = \begin{pmatrix} I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ & 0_{2 \times 4} \\ & 0_{2 \times 4} \end{pmatrix}$$

우리는 새로운 좌표 $\dot{\bar{x}}_i = J_i \eta_i(t)$ 로써 정의하고, 이 식을 식(12)에 대입하여 정리하면 AGV 시스템의 실제 동적방정식을 유도할 수 있다. 또한, 식(9)과 식(10)에 이 식에 대입하여 정리하고 식(4)와 식(5)을 이용함으로써 다음과 같은 동적방정식을 유도할 수 있다.

$$\overline{M}_w \ddot{\bar{x}}_w = (\nu_1 \ \nu_2 \ 0_{2 \times 1} \ 0)^T - J_o^T \lambda \quad (14)$$

$$J_o \ddot{\bar{x}}_w = 0 \quad (15)$$

식 (4)와 식(5) 그리고 위의 식에 대한 도함수를 이용함으로써 우리는 이동물체의 무게중심 좌표와 새로운 좌표 \bar{x}_i 에 대한 관계로부터 다음과 같은 방정식을 유도할 수 있다.

$$\dot{\bar{x}}_o = \dot{\bar{x}}_1 + (I_{2 \times 2} \ 0_{2 \times 2}) J_\psi \dot{\psi} \quad (16)$$

$$\dot{\bar{x}}_o = \dot{\bar{x}}_2 + (0_{2 \times 2} \ I_{2 \times 2}) J_\psi \dot{\psi} \quad (17)$$

3. 분산 이송제어 알고리즘 설계

이송물체에 대한 협조 AGV 시스템의 분산수동속도장 제어 알고리즘을 설계하기 위하여, 우리는 $\dot{\psi}$ 가 각 시스템들에 대하여 측정되어진다고 가정한다. 본 논문에서 제안되어지는 제어 알고리즘에 대한 구성도는 그림 2에서 보여진다.

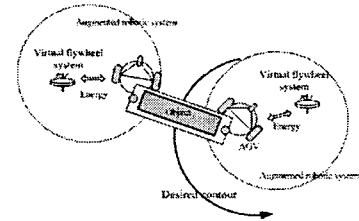


그림 2. 분산 PVFC의 개략도

Fig. 2 Schematic configuration of decentralized passive velocity field algorithm

만약 실제 제어입력을 다음과 같이 정의하면,

$$\nu_1 = \dot{\nu}'_1 - (I_{2 \times 2} \ 0_{2 \times 2})(J_\psi \dot{\psi} + \dot{J}_\psi \psi) \quad (18)$$

$$\nu_2 = \dot{\nu}'_2 - (0_{2 \times 2} \ I_{2 \times 2})(J_\psi \dot{\psi} + \dot{J}_\psi \psi) \quad (19)$$

우리는 식(16)과 식(17)의 도함수에 식 (18)과 식(19)를 대입하여 새롭게 정리할 수 있고, 이송물체에 대한 운동방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(I_{2 \times 2} + M_o + I_{2 \times 2}) \ddot{\bar{x}}_o = \dot{\nu}'_1 + \dot{\nu}'_2 \quad (20)$$

식 (20)에서, 세 개의 질량성분으로 구성되어 있는 무게중심의 동적방정식이 $\dot{\nu}'_1$ 와 $\dot{\nu}'_2$ 에 의하여 제어되어짐을 알 수 있다. 그러므로, 우리는 이전의 연구들에서 제안되어진 분산 수동속도장 제어 알고리즘을 적용할 수 있다. [2]

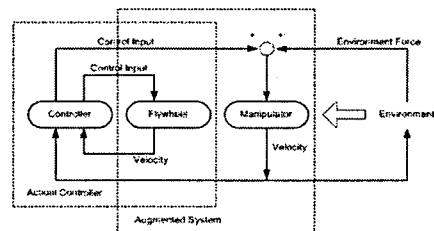


그림 3. 분산 제어 알고리즘의 블록선도

Fig. 3 Block diagram of decentralized control algorithm

본 논문에서 고려되어지는 분산 수동속도장 제어 알고리즘의 블록선도는 그림 3에서 보여지고, 이러한 제어 알고리즘에 대한 주요 정리는 이전의 연구 [3]에서 자세히 기술되어져 있으며 다음과 같이 간략히 정리되어진다.

정리 1: 그림 2에서 보여지는 분산 수동속도장 제어시스템에 대한 피드백 시스템을 고려하자. 특히, 식(20)에 의하여 유도되어지는 각각의 수동속도장 운동 방정식과 가상의 확장 시스템으로 구성되는 제어 알고리즘을 의미한다. 이때, 본 논문에서 제안되어지는 분산 수동속도장 제어 알고리즘의 수동성과 수렴성은 다음과 같이 요약되어진다. [3]

(1) 확장된 피드백 시스템은 다음과 같이 정의되어진

$$s(F, \dot{x}) = \langle F, \dot{x} \rangle = F^T \dot{x}$$

Supply rate에 의하여 수동(Passive)이다. 단, F 와 \dot{x} 는 각각 입력과 출력을 의미한다.

(2) 속도오차에 대하여, 이송물체의 속도는 외부환경에 대하여 항상 Lyapunov 안정성을 만족한다.

4. 모의실험

본 단원에서, 우리는 수치적 모의실험을 통하여 다중 AGV 시스템들에 대한 협조 이송제어의 성능을 평가하고 제안되어진 제어 알고리즘을 유효성을 검증한다. 모의실험에서, 목표 속도를 따라서 움직일 때 목표 속도장은 반시계방향으로 일정속도로써 각 점에 수렴함을 알 수 있다. 특히, 제안되어진 시스템의 효율성을 검증하기 위하여, 15[sec]에서 20[sec] 사이에서 (10, 0)[N]의 외력을 가하였다.

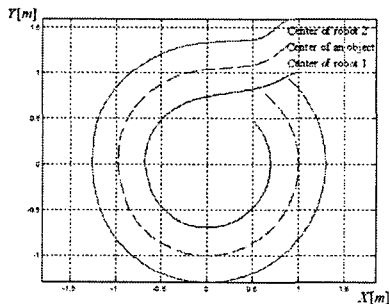


그림 4. 2대의 로봇과 물체의 궤도

Fig. 4 Trajectories of two robots and an object

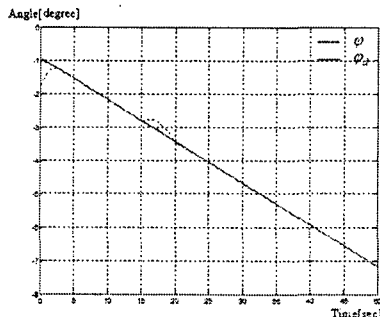


그림 5. 2대의 AGV 시스템의 궤도각

Fig. 5 Trajectory angle of two AGV systems

협조 AGV 시스템과 이송물체에 대한 목표궤도와 실제궤도에 대한 모의실험 실행결과를 그림 4에서 보여준다. 이 결과로써, 이송물체 중심은 몇몇 추종오차가 파라미터들의 불확실성

에 의하여 존재하더라도 목표궤도를 추종함을 보여준다. 이때, 그림 5는 이송물체의 각 변화를 보여주고 있다. 마지막으로, 그림 6은 외란을 가진 구속력에 대한 변화를 보여주고 있다.

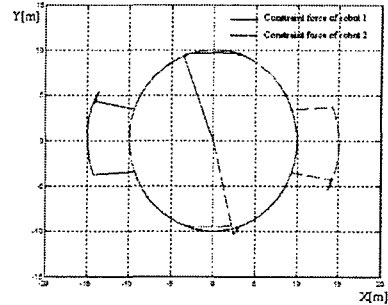


그림 6. 외란에 대한 구속력

Fig. 6 Constraint forces with disturbances

5. 결 론

본 논문에서, 우리는 두 대의 AGV 시스템에 분산 수동속도장 제어 알고리즘을 적용하여 다중 시스템의 이송물체에 적용하였다. 더구나, 다중 AGV 시스템에 대한 안정성을 보증하였고 시스템 확장을 통한 속도들은 협조 이송시스템들에 대한 목표 속도장에 수렴함을 알 수 있었다.

마지막으로, 시스템 확장을 통한 분산 수동속도장 제어 알고리즘을 원을 추종하기 위한 모의실험에 적용하였고, 그 결과로써 본 논문에서 제안되어진 제어 알고리즘의 유효성을 검증할 수 있었다. 추후에 항만 자동화의 필수요소인 무인 이송시스템 설계 및 실행에 있어서 본 논문에서 제안되어진 제어 알고리즘을 적용하여 실제적인 산업현장에서 이용되어질 수 있는 실제실험을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 과학재단 목적기초연구(R01-2005-000-10418-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Li, P.Y. and Horowitz, R., "Passive Velocity Field Control of Mechanical Manipulator", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 15, no. 4, pp. 751-763, 1999.
- [2] Yamakita, M., Suh, J. H., Hashiba, K., "Decentralized PVFC for Cooperative Mobile Robots", Trans. on IEE Japan, vol. 120-C, no. 10, pp. 1485-1491, 2000.
- [3] Suh, J.H. and Lee, K.S., "Object-Transportation Control of Multiple AGV Systems Based on Virtual-Passivity Decentralized Control", Proc. of Int. Conference on Mechatronics Technology, 2004
- [4] Slotine, J.J. and Li, Y., Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, 1991.
- [5] Hashimoto, M., "Object-Transportation Control by Multiple Wheeled Vehicle Planar Cartesian Manipulator Systems", Proc. of ICRA, pp. 2267-2272, 1995.