

2자유도 PID 제어를 이용한 UCT의 조향제어에 관한 연구

\*손주한\* · 이영진\* · 이진우\* · 조현철\* · 이만형\*\* · 이권순\*  
 \*동아대학교 전기공학과, \*\*부산대학교 기계공학부

A Study on UCT Automatic Steering Control using TDOF PID Controller

\* Ju Han Son\* · Young Jin Lee\* · Jin Woo Lee\* · Hyun Cheol Cho\* · Man hyeung Lee\*\* · Kwon Soon Lee\*  
 \*Dept. of Electrical Eng., Dong-a University, \*\*Dept. of Mechanical Eng., Pusan National University

**Abstract** - Until now, all of the port goods are transported by container transporter driven manually but recently there are a lot of researches about unmanned vehicle driven automatically. In this paper, we present a design of the TDOF PID controller using a hybrid schematic algorithm to control steering system. We used the ES and SA algorithms to construct hybrid tuning algorithm. Then the computer simulation shows that our proposed controller has better performances than the other one.

1. 서 론

최근 항만의 효율적인 운영과 물류비용의 절감을 위하여 항만하역시스템 자동화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데, 컨테이너를 운반하는 트레일러의 무인화에 대한 연구에 많은 관심이 모이고 있다. 이러한 경향은 항만에서의 화물 하역 작업이 정해진 주행 환경에서 자율적으로 운행하여 노동력의 고용에 대한 문제점 및 비용절감, 그리고 항만 양/하역 작업의 효율성을 향상시키기 위한 최적의 방향제어가 되고 있기 때문이다. 그리고, 최근 유럽의 네덜란드 및 싱가포르에서는 실제로 UCT가 설치되어 운영되고 있는 실정이다.

실제 부두에서 운영되는 UCT(Unmanned Container Transporter)는 2WS(2 wheel steering) 방식이나 4WS의 조향시스템을 가지며, 전방부에 부착된 조향센서와 주행 도면에 설치된 가이드 라인과의 편차를 적응성 있게 줄여 가면서 컨테이너를 안전하게 운반하도록 운영되고 있다. 이러한 UCT는 일반차량에서와 같이 속도변화, 중량 변화, 관성모멘트, 타이어의 마찰 계수 등 많은 비선형적 요소들을 내포하고 있어 최적의 제어기 설계에 어려움이 많은 것으로 보고되고 있다.

본 논문에서는 UCT가 갖는 여러 가지 비선형 요소를 고려한 최적의 제어기를 설계하고자 하며, 설계된 제어기의 성능평가를 위한 사전 검증단계로서 Riekerk와 Shunk에 의해 제시된 single-track(two wheel) 차량모델[1]을 사용하였다. 또한, 조향제어기 설계를 위하여 2자유도 PID(TDOF PID: 2-Degree of Freedom PID)제어기를 도입하였으며, 제어기 파라미터 설계를 위하여 ES(Evolutionary Strategy) 및 SA(Simulated Annealing)를 이용한 하이브리드형 자동동조 알고리즘을 구현하였다. 아울러 설계된 제어기의 성능평가를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 차량의 수학적 모델링

UCT의 조향 시스템을 2WS방식으로 고려하면, 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

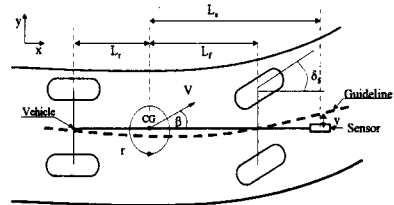


그림 1. 차량시스템의 모델

그림 1에서 차량의 CG(center of gravity)가 도로 상에 있고, CG에 작용하는 힘이 롤링(rolling)과 피칭(pitching)을 일으키지 않는다고 가정하면, Riekerk와 Shunk에 의해 제시된 그림 2의 single-track(two wheel) 모델로 나타낼 수 있다[1].

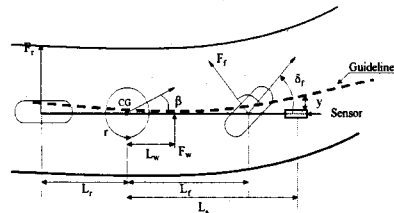


그림 2. Single-track 모델

여기서, 제어되어야 할 파라미터는 조향각  $\delta_f$ 로서 제어입력  $u_f$ 와 외란  $F_w$ 에 따라 제어되며, 그림 2에 대한 조향 시스템의 상태 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\Delta\phi} \\ \dot{y} \\ \dot{\delta}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & b_{11} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & b_{21} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ V & L_s & V & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ \Delta\phi \\ y \\ \delta_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{11} \\ 0 & 0 & d_{21} \\ 0 & -V & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ \rho_{ref} \\ F_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{-(C_r + C_f)}{MV}, & a_{12} &= -1 + \frac{(C_r L_r - C_f L_f)}{MV^2} \\ a_{21} &= \frac{(C_r L_r - C_f L_f)}{J}, & a_{22} &= -\frac{C_r L_r^2 + C_f L_f^2}{JV} \\ b_{11} &= \frac{C_f L_f}{MV}, & b_{21} &= \frac{C_f L_f}{J} \\ d_{11} &= \frac{1}{MV}, & d_{21} &= \frac{L_w}{J} \end{aligned}$$

식 (1)에 대한 각 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 차량시스템 파라미터

파라미터	내용
$\delta_f$	전방 휠의 조향각
$L_f(L_r)$	전방 axle 과 CG 까지 거리[m]
$\bar{V}$	크기 V를 가지는 CG에서의 속도 벡터
$\beta$	차량 중심선과 속도 벡터간의 미끄러짐각
$F_f(F_r)$	전방 타이어에 의한 측면 힘[N/m]
$y$	측면 변위[m]
$F_w$	측면 외란(바람)
$L_w$	CG와 $F_w$ 간의 거리[m]
$L_s$	안내 선으로부터 변위를 측정하는 센서로부터 CG까지 거리[m]
$\Delta\psi$	안내선의 접선으로부터 차량의 중심선까지 거리[m]
$r$	요속도, $\Delta\psi = r$
$C_f(C_r)$	전후방축의 코너링 강성[N/rad]
$P_{ref}$	참조 조향각
$M$	차량의 무게[kg]
$\bar{M}$	차량의 실제 무게[kg]
$J$	관성 모멘트

코너링 강성은 도로의 마찰계수를 고려하면  $\mu C_f, \mu C_r$ 가 된다. 또한,  $M$ 과  $J$ 도  $\mu$ 에 의해 일반화된다 ( $\bar{M} = M/\mu, \bar{J} = J/\mu$ )는 도로의 마찰계수로 건조한 날은 일반적으로 1이고 비오는 날은 0.5이며, 본 논문에서는 건조한 날인  $\mu = 1$ 로 하였다. 그리고 차량이 전방 바퀴에 의해서만 조향되면,  $\delta_r$ 은 0이 되므로 전방 조향 제어입력은 다음과 같다.

$$\delta_f = u_f \quad (2)$$

### 3. TDOF PID 조향 제어 알고리즘

#### 3.1 TDOF PID 제어기

차량에 대한 전체적인 조향제어 시스템은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다[2].

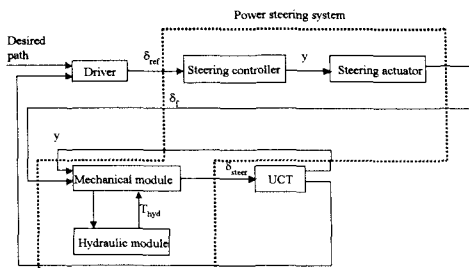


그림 3. 차량의 조향 제어시스템

그림 3에서 조향제어부는 외란에 대해서도 설정치를 잘 추종하는 특징을 가지고 있는 TDOF PID 제어기로 하였다[3]. 제어기의 파라미터는 ES와 SA를 이용한 하이브리드형 알고리즘을 이용하여 자동 동조하였

다. 본 논문에서 제어시스템에 대한 블록선도는 그림 4와 같다. 그림 4에서  $y(t)$ 는 가이드라인과 차량의 조향센서와의 편차로서 이 신호는 제어기에 피드백되고, UCT의 조향각 제어입력에 인가된다.

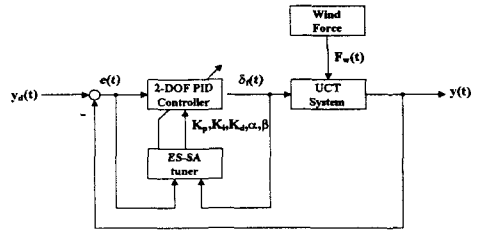


그림 4. Hybrid ES-SA tuned TDOF PID 제어기

#### 3.2 하이브리드 ES-SA 알고리즘

제어기의 파라미터 설계를 위하여 도입된 자동동조 알고리즘은 그림 5와 같이 ES와 SA 알고리즘을 복합적으로 적용하여 진화론적 탐색과 확률론적 탐색을 통하여 향상된 해의 탐색능력을 가질 수 있도록 설계하였다(4-5).

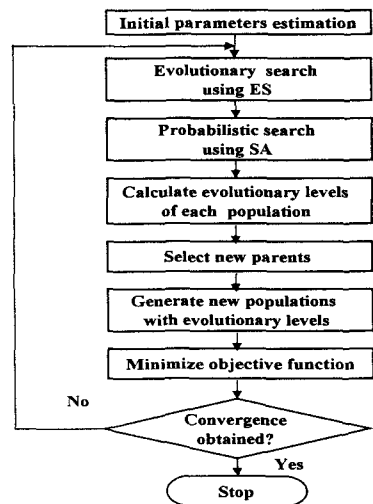


그림 5. Hybrid ES-SA algorithm

제안된 하이브리드 구조는 먼저 초기의 부모세대로부터 식 (3)과 같이 다음 세대의 자손을 생성하여 부모세대와 경쟁을 통하여 생존확률(fitness probability)이 높은 자손을 우수한 자손으로 선택하여 다음 세대의 부모가 되도록 하였다.

$$x^{t+1} = x^t + N(0, \sigma) \quad (3)$$

여기서,  $N(0, \sigma)$ 는 평균이 0이고 표준편차가  $\sigma$ 인 독립적인 랜덤 가우시안 함수이며,  $x^{t+1}$ 는 다음세대에 부모로부터 받아들여질 자손 개체이며, 이러한 과정을 진화론적 탐색이라 할 수 있다. 그러나, 만약 각 세대의 자손들의 그들 부모보다 좋지 않은 생존확률을 갖는다면, 식 (4)와 같이 볼츠만(Boltzmann) 확률에 따라 우수한 자손으로 받아들여지도록 하였다. 이것은 비록 다음세대의 자손이 우수한 생존확률을 가지고 있지 않더라도 항상 우수한 자손이 다음세대의 부모로 선택될 수 있다는 확률론적 탐색을 의미한다[6-7].

$$p(t) = \exp(-\Delta E/T(t)) \quad (4)$$

여기서,  $\Delta E = f(x^{t+1}) - f(x^t)$ 이고  $f(x)$ 는 각 개체의 생존확률을 나타내며,  $T(t)$ 는 SA법의 쿨링 스케줄(cooling schedule)을 나타내는 것으로써 탐색시간을 빠르게 하기 위하여  $T(t) = T_0 / \log t$ 로 하였다.

그러나, 이러한 탐색은 각 부모가 소속된 개체군내에서의 경쟁에 의해서만 이루어지므로 국부해에 도달할 우려가 있다. 따라서, 각 개체군이 가지는 자손이 다음 세대에 우수한 개체로 진화될 수 있도록 식 (5)와 같이 각 개체군의 진화레벨(evolutionary level)에 따라 각 세대에 페널티를 적용하여 우수한 개체는 더욱 많은 자손을 낳을 수 있도록 하고 그렇지 못한 개체는 도태시키도록 하였다.

$$P_i(t+1) = \Sigma P(t) \times \text{Level}_i \quad (5)$$

여기서,  $P_i(t+1)$ 는 각 개체군이 가질 다음세대의 개체수이고,  $\Sigma P(t)$ 는 현재세대의 모든 개체군의 자손 수이며,  $\text{Level}_i$ 는 각 개체군이 가지고 있는 진화레벨이다. 또한, 각 세대의 적합도를 평가하기 위한 평가함수는 시스템의 시간에 따른 위치오차와 효율적인 제어를 위한 제어에너지를 고려하여 식 (6)과 같이 설정하였다.

$$f(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (R_1 \cdot e^2(t) + R_2 \cdot u_{rms}^2(t)) \quad (6)$$

여기서,  $e^2(t)$ 는 차량의 위치오차,  $u_{rms}^2(t)$ 는 제어 실효(RMS) 에너지이며,  $R_1$ 과  $R_2$ 는 각각의 가중치이다.

#### 4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서 제안한 TDOF PID의 성능을 검토하기 위하여 2WS 차량에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, LQ 제어기를 적용하여 응답특성을 비교 분석하였다.

표 2는 시뮬레이션에 사용한 차량시스템에 대한 사양을 나타내며, 제어성능평가를 위하여 차량의 속도는 20(m/s)로 일정하게 하였고, 중량은 9950(kg)과 화물중량을 고려한 32000(kg)일 때의 경우에 대해 각각 실험하였다. 그리고, 시스템을 간단히 하기 위해  $\rho_{ref}$ 와  $F_w$ 는 0으로 하였다. 초기의 차량의 위치는 설정치에서 1.5(m) 떨어진 곳에서 출발하도록 하였다.

표 2. 차량시스템의 파라미터값

파라미터	파라미터 값
V	20[m/s]
$L_r$	3.67 [m]
$L_l$	1.93[m]
$L_s$	6.12[m]
$L_w$	0.565[m]
$C_l$	198000[N/rad]
$C_r$	470000[N/rad]
M	9950 / 32000[kg]
$\mu$	1
J	$i^2 \times M$
$i^2$	10.85[m <sup>2</sup> ] ( $i$ =관성 반경)

그림 6과 7은 각각 차량의 중량을 9950[kg]으로 하였을 때 LQ 제어기 및 TDOF PID 제어기를 적용하였을 경우를 나타낸다.

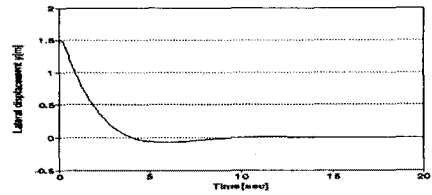


그림 6. LQ 제어에 대한 차량의 출력 (M = 9950(kg))

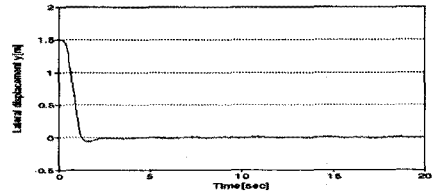


그림 7. TDOF PID 제어에 대한 차량의 출력 (M = 9950(kg))

LQ 제어의 경우, 차량은 설정치에 도달하는 시간이 약 9초 정도가 걸렸으며, 약 6초 부근에서 3% 정도의 언더슈트가 발생되었다. 그러나, TDOF PID의 경우는 정정시간은 약 2.5초이고, 약 1.5초 부근에서 5% 정도의 언더슈트가 발생되었다. 언더슈트면에서 TDOF PID는 LQ보다 약 2%정도가 더 발생되었지만, 정정 시간면에서는 LQ보다 매우 빨리 수렴되었음을 알 수 있다.

그림 8과 9는 차량에 화물을 실은 상태에 대한 것으로서 각각의 제어기를 적용하였을 때 차량의 출력을 나타낸다.

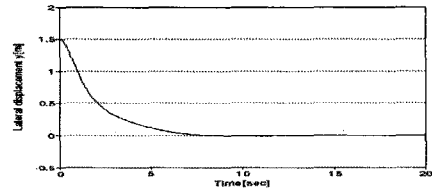


그림 8. LQ 제어에 대한 차량의 출력 (M = 32000(kg))

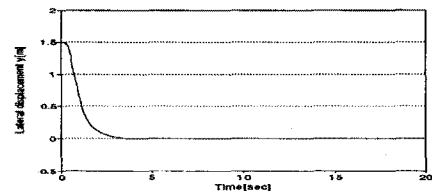


그림 9. TDOF PID 제어에 대한 차량의 출력 (M = 32000(kg))

LQ 제어의 경우 정정시간은 약 9.5초이며, TDOF PID는 약 4초 정도가 걸렸다. 그러나, 앞의 경우에 비해 언더슈트가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 이것은 차량의 중량이 증가함에 따라 차량의 응답속도가 앞

의 경우보다 느린 것으로 분석된다. 그러나, 정정시간에서는 LQ보다 TDOF PID의 경우가 약 4.5초 빨랐으며 보다 더 우수한 제어성능을 발휘함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 차량의 조향제어를 위하여 TDOF PID 제어를 구성하였으며, 제어기의 파라미터는 하이브리드 ES-SA 알고리즘을 이용하였다. 제어성능을 비교 분석하기 위하여 기존의 LQ 제어기와 함께 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였으며, 그 결과 본 논문에서 설계된 TDOF PID가 LQ에 비해 정정시간이 50%정도 감소되었음을 알 수 있었다. 또한, 차량의 중량변화에 대해서도 제어성능이 보다 우수함을 입증하였다.

향후 연구과제로써는 차량시스템에 대해 비선형 요소와 외란부분 등에 대한 고려와 가변되는 속도와 항만의 도로상태를 고려하여 실제 상황에서 적용성을 부여한 연구가 이루어져야 할 것을 생각된다.

#### [참고 문헌]

- [1] J. Ackermann, J. Guldner, W. Sienele, R. Steinhäuser, and V. I. Utkin, "Linear and nonlinear controller design for robot automatic steering," IEEE transaction on control systems technology, vol. 3, No. 1, 1995.
- [2] W. Schiehlen, R. Durr, U. Pertersen, and A. Rukaguer, "Modular modeling of steering control system," Conference on motion and vibration control, pp. 116-121, 1996.
- [3] 김동화, 이원규, "신경망 2-자유도 PID 제어를 이용한 원자력 발전소용 증기 발생기 수위제어," Journal of control, automation and systems Eng., Vol. 4, No. 3, pp. 321-328, 1998.
- [4] Suzannah and Y. W. Wong, "Hybrid genetic/simulated annealing approach to short-term multiple-fuel-constrained generation scheduling," IEEE transactions on power systems, Vol. 12, No. 2, 1997.
- [5] I. K. Jeong and J. J. Lee, "Adaptive simulated annealing genetic algorithms control applications," International journal of systems science, Vol. 27, No. 2, 1996.
- [6] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, 1996.
- [7] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," Science, Vol. 220, pp. 671-680, 1983.