

무인 국방 로봇의 효과적인 다물체 동역학 해석을 위한 부분시스템 합성방법 기반 DAE 해석 기법 비교 연구[§]

김명호* · 김성수**† · 윤홍선*

* 충남대학교 기계 · 기계설계 · 메카트로닉스공학과, ** 충남대학교 메카트로닉스공학과

Comparative Study on DAE Solution Methods for Effective Multi-Body Dynamics Analysis of Unmanned Military Robot Based on Subsystem Synthesis Method

Myoung Ho Kim*, Sung-Soo Kim**† and Hong-Seon Yun*

* Graduate school of Mechanical · Mechanical Design · Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received December 28, 2012 ; Revised July 19, 2013 ; Accepted July 28, 2013)

Key Words: DAE(미분대수방정식), Unmanned Military Robot(무인 국방 로봇), Multi-body Dynamics(다물체 동역학), Subsystem Synthesis Method(부분시스템 합성방법)

초록: 무인 국방 로봇의 실시간 해석을 위해서는 효과적인 해석기법이 필수적인 요소이다. 이러한 효과적인 해석을 위하여 부분시스템 합성방법이 개발되었다. 부분시스템 합성방법은 기준 물체의 운동방정식과 각 부분시스템들의 운동방정식을 독립적으로 계산함으로써 계산량의 이득을 볼 수 있다. 운동방정식은 미분방정식과 대수방정식이 혼합된 미분대수방정식으로 표현된다. 이러한 미분대수방정식의 정확하고 효과적인 해석을 위해서 직접 적분방법, 구속조건식 안정화기법, 일반 좌표 분할기법 등이 개발되었다. 본 논문에서는 무인 국방 로봇의 효과적인 해석을 위하여 부분시스템 합성방법을 적용하고 위에서 기술한 세 가지의 미분대수방정식 해석기법을 비교하는 연구를 수행하였다.

Abstract: An effective method is necessary for the real-time analysis of an unmanned military robot. To achieve highly efficient simulations, a subsystem synthesis method has been developed. The subsystem synthesis method separately generates equations of motion for the base body and for the subsystem. The equations of motion are expressed by DAE, which consist of differential equations and algebraic equations. To increase the accuracy and efficiency of solutions, DAE solvers such as the Direct, CS (Constraint Stabilization), and GCP (Generalized Coordinate Partitioning) method are employed. In this study, the subsystem synthesis method is applied for effective multi-body dynamics analysis of an unmanned military robot, and a comparative study of three different DAE solvers is carried out.

1. 서론

최근 첨단과학 및 정보통신 기술의 발전으로 인하여 무인 국방 로봇과 같은 자율주행 차량의 연구가 활발히 진행되고 있다.

무인 국방 로봇의 자율주행을 위해서는 주행 중 발생할 수 있는 여러 가지 상황에 따라 차량의 거

동을 실시간으로 예측하여 안정적인 주행제어 기법이 필요하다.⁽¹⁻³⁾

실시간으로 차량의 거동을 예측하기 위해서는 효율적인 해석기법을 이용한 실시간 다물체 동역학 해석이 반드시 수행되어야 한다. 이러한 실시간 해석을 위하여, 부분시스템 합성방법이 개발되었다.⁽⁴⁻⁶⁾ 부분시스템 합성방법은 기준 물체의 운동방정식과 각 부분시스템들의 운동방정식을 독립적으로 해석하는 방법으로 무인 국방 로봇과 같이 동일한 현수장치가 여러 개 달려있는 시스템에 효과적으로 적용할 수 있는 해석기법이다. 또한 먼저 한 개의 부분시스템으로 구성되어 있는 모델이

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECCO) 발표논문임

† Corresponding Author, sookim@cnu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

개발되면 그것을 효과적으로 합성하여 여러 개의 부분시스템으로 이루어진 전 차량 모델을 생성하는 효과적인 방법이다.

직교 좌표계를 이용한 3 차원 시스템의 부분시스템 합성방법은 기준 물체의 운동방정식과 각 부분시스템들의 운동방정식이 미분방정식과 대수방정식이 혼합된 미분대수방정식 (DAE)형태로 구성이 된다.^(5,6) 따라서 실시간 해석을 위해서는 미분대수방정식의 안정적이고 효율적인 해석기법이 필요하다. 기존의 미분대수방정식의 해법으로는 DAE 를 직접적으로 계산하는 기법과 일반 좌표 분할기법^(7,9) 및 구속조건식 안정화기법⁽⁸⁾ 등이 개발되었다.

본 논문에서는 6 개의 동일한 현수장치로 구성된 무인 국방 로봇의 안정적이고 또한 효과적인 해석을 위하여, 직교좌표계 부분시스템 합성방법 기반의 직접 적분방법과 일반 좌표 분할기법 및 구속조건식 안정화기법을 제시하고 세 가지 방법의 정확성을 비교하였다. 또한 부분시스템 합성방법의 효과를 고찰하기 위해서 부분시스템 합성방법과 일반적인 해석기법의 계산 효율성을 비교하였다.

2. 부분시스템 합성방법 기반 무인 국방 로봇의 동역학 해석

2.1 무인 국방 로봇 시스템

무인 국방 로봇은 Fig. 1 과 같이 6 개의 동일한 구조의 독립적인 현수장치로 구성이 되어있다. 실제 복잡한 구조의 현수장치 대신 계산의 효율을 높이기 위하여 Fig. 2 와 같이 현수장치 특성은 동일하면서 구조가 단순화된 모델을 이용하였다.

Fig. 2 의 단순화된 모델에 대한 물성치는 Table 1 에 나타내었다.



Fig. 1 An unmanned military robot

2.2 부분시스템 합성방법

무인 국방 로봇에 부분시스템 합성방법을 적용하면 Fig. 3 과 같이 1/6 차량 모델을 효과적으로 합성하여 전차량 모델을 생성할 수 있다.

먼저 Fig. 2 와 같은 1/6 차량에 대한 일반적인 운동방정식을 오일러 매개변수를 이용하여 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_0 & \mathbf{0} & \Phi_{y_0}^T & \Phi_{y_0}^{p_0T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_1 & \Phi_{y_1}^T & \mathbf{0} & \Phi_{y_1}^{p_1T} \\ \Phi_{y_0} & \Phi_{y_1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \Phi_{y_0}^{p_0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Phi_{y_1}^{p_1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_0 \\ \ddot{y}_1 \\ \lambda \\ \lambda^{p_0} \\ \lambda^{p_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_0 \\ \mathbf{Q}_1 \\ \gamma \\ \gamma^{p_0} \\ \gamma^{p_1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Table 1 Mechanical properties of the suspension

Force properties	Values
Rotational spring stiffness	31.416 Nm/degree
Rotational damping coefficient	10.47 Nm·s/degree
Tire vertical stiffness	200,000 N/m

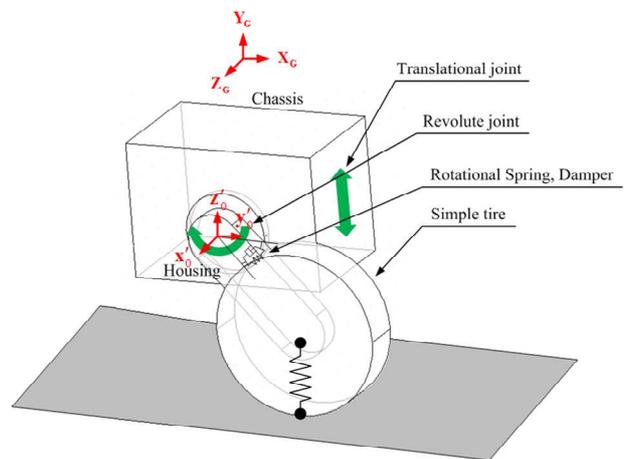


Fig. 2 1/6 unmanned military robot model

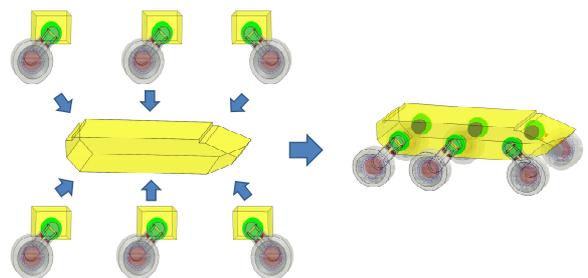


Fig. 3 Subsystem synthesis method for unmanned military robot

여기서,

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} m_i \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 4\mathbf{G}_i^T \mathbf{J}_i' \mathbf{G}_i \end{bmatrix}, (i=0,1)$$

$$\mathbf{Q}_i = [\mathbf{F}_i, 2\mathbf{G}_i^T \mathbf{n}_i' + 8\dot{\mathbf{G}}_i^T \mathbf{J}_i' \dot{\mathbf{G}}_i \mathbf{p}_i]^T, (i=0,1)$$

$$\ddot{\mathbf{y}}_i = [\ddot{\mathbf{r}}_i^T, \ddot{\mathbf{p}}_i^T]^T, (i=0,1)$$

$\Phi_{y_i}^{p_i}$ 는 각 물체의 오일러 매개변수 구속조건식에 대한 자코비언 행렬, Φ_{y_0}, Φ_{y_1} 은 기준 물체 0(차체)와 물체 1(현수장치링크) 사이의 회전 조인트 구속조건식에 대한 자코비언 행렬을 나타낸다. 또한 $\lambda, \lambda^{p_i}, (i=0,1)$ 는 회전 조인트와 오일러 매개변수 구속조건식에 대한 라그랑지 승수를 각각 나타내고 있으며, $\gamma, \gamma^{p_i}, (i=0,1)$ 는 회전 조인트와 오일러 매개변수 구속조건식을 두 번 미분한 식에 대한 오른쪽 항을 나타내고 있다.

보다 손쉽게 부분시스템 합성방법을 적용하기 위해서는 식 (1)의 운동방정식을 각 물체 별 오일러 매개변수 구속조건식을 포함하도록 식 (2)와 같은 구조로 변경할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_0 & \Phi_{y_0}^{p_0 T} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Phi_{y_0}^T \\ \Phi_{y_0}^{p_0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_1 & \Phi_{y_1}^{p_1 T} & \Phi_{y_1}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Phi_{y_1}^{p_1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \Phi_{y_0} & \mathbf{0} & \Phi_{y_1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}}_0 \\ \lambda^{p_0} \\ \ddot{\mathbf{y}}_1 \\ \lambda^{p_1} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_0 \\ \gamma^{p_0} \\ \mathbf{Q}_1 \\ \gamma^{p_1} \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 보다 축약된 형태로 표현하면 식 (3)과 같이 8x8 크기의 오일러 매개변수 구속조건식을 포함한 질량 관성 행렬의 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{M}}_0 & \mathbf{0} & \Phi_{y_0}^T \\ \mathbf{0} & \bar{\mathbf{M}}_1 & \Phi_{y_1}^T \\ \Phi_{y_0} & \Phi_{y_1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}}_0 \\ \ddot{\mathbf{y}}_1 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Q}}_0 \\ \bar{\mathbf{Q}}_1 \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$\bar{\mathbf{M}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \Phi_{y_i}^{p_i T} \\ \Phi_{y_i}^{p_i} & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(8 \times 8)}, \bar{\mathbf{Q}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_i \\ \gamma^{p_i} \end{bmatrix}_{(8 \times 1)}, \ddot{\mathbf{y}}_i = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}}_i \\ \lambda^{p_i} \end{bmatrix}_{(8 \times 1)} \quad (i=0,1)$$

식 (3)의 구조가 변경된 운동방정식에 부분시스템 합성방법을 적용하면 아래와 같이 식 (4)의 부

분시스템 운동방정식과 식 (5)의 기준 물체 운동방정식을 독립적으로 표현할 수 있다.^(5,6)

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{M}}_i & \Phi_{y_i}^T \\ \Phi_{y_i} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}}_i \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Q}}_i \\ \gamma - \Phi_{y_0} \ddot{\mathbf{y}}_0 \end{bmatrix}, (i=1) \quad (4)$$

$$(\bar{\mathbf{M}}_0 + \bar{\mathbf{M}}_i^c) \ddot{\mathbf{y}}_0 = (\bar{\mathbf{Q}}_0 + \bar{\mathbf{Q}}_i^c), (i=1) \quad (5)$$

식 (5)에서 $\bar{\mathbf{M}}_i^c$ 와 $\bar{\mathbf{Q}}_i^c$ 는 각각 부분시스템의 효과 관성 행렬과 효과 힘 벡터로써 식 (6)~(7)과 같이 정의된다.

$$\bar{\mathbf{M}}_i^c = \Phi_{y_0}^T (\Phi_{y_i} \bar{\mathbf{M}}_i^{-1} \Phi_{y_i}^T)^{-1} \Phi_{y_0}, (i=1) \quad (6)$$

$$\bar{\mathbf{Q}}_i^c = \Phi_{y_0}^T (\Phi_{y_i} \bar{\mathbf{M}}_i^{-1} \Phi_{y_i}^T)^{-1} (\gamma - \Phi_{y_i} \bar{\mathbf{M}}_i^{-1} \bar{\mathbf{Q}}_i), (i=1) \quad (7)$$

따라서 각부분시스템의 효과 관성 행렬과 효과 힘 벡터를 식 (6)~(7)을 이용하여 계산한 후 기준 물체에 전달하여 식 (5)의 기준 물체 운동방정식을 통해 기준 물체의 가속도를 구할 수 있다. 이렇게 구한 기준 물체의 가속도를 부분시스템에 전달하여 식 (4)를 이용하면, 부분시스템의 가속도와 라그랑지 승수를 계산할 수 있어 기준 물체와 부분시스템을 독립적으로 해석할 수 있게 된다.

1/6 차량 모델로부터 부분시스템 합성을 통하여 전차량 모델로 운동방정식을 확장할 경우는 단지 식 (5)에 각각의 부분시스템으로부터 식 (6)과 식 (7)의 효과 관성 행렬과 효과 힘 벡터($i=1, \dots, 6$)를 식 (8)에 포함하여 가속도를 구하고, 앞서 기술한 바와 같이 식 (4)에 의해서 각 부분시스템들 ($i=1, \dots, 6$)의 가속도와 라그랑지 승수를 구하면 된다.

$$(\bar{\mathbf{M}}_0 + \sum_{i=1}^6 \bar{\mathbf{M}}_i^c) \ddot{\mathbf{y}}_0 = (\bar{\mathbf{Q}}_0 + \sum_{i=1}^6 \bar{\mathbf{Q}}_i^c) \quad (8)$$

3. 부분시스템 합성방법 기반 일반 좌표 분할기법

일반 좌표 분할기법은 시스템을 기술하는 직교 좌표로 표현된 일반 좌표를 독립 좌표와 종속 좌표로 분할 하고 종속 좌표를 독립 좌표의 함수로 변환하여 미분대수방정식의 해를 구하는 방법이다.

부분시스템 합성방법에 일반 좌표 분할기법을 적용하면 기준 물체의 좌표계 $\mathbf{y}_0 = [\mathbf{r}_0^T, \mathbf{p}_0^T]^T$ 와 각 부

분시스템 좌표계 $\mathbf{y}_i = [\mathbf{r}_i^T, \mathbf{p}_i^T]^T$ 에서 독립 좌표를 선정하여 기준 물체의 미분대수 운동방정식과 부분시스템의 미분대수 운동방정식을 각각 계산하게 된다.

기준 물체의 좌표 7 개 중 6 개의 독립 좌표 (x_0, y_0, z_0 와 오일러 매개변수 4 개 중 3 개)를 선정하여 식 (9)와 같이 오일러 매개변수 구속조건식을 만족하도록 종속 좌표를 먼저 보정한다.

$$\begin{aligned} \Phi_{\mathbf{u}_0}^{\mathbf{p}_0} \Delta \mathbf{u}_0^{(k)} &= -\Phi^{\mathbf{p}_0} \\ \mathbf{u}_0^{(k+1)} &= \mathbf{u}_0^{(k)} + \Delta \mathbf{u}_0^{(k)} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\Phi_{\mathbf{u}_0}^{\mathbf{p}_0}$ 는 오일러 매개변수 구속조건식에 대한 종속 좌표 자코비언 행렬을 나타낸다.

다음으로 식 (10)과 같이 오일러 매개변수 속도 구속조건식을 만족하도록 한 후 보정된 기준 물체의 위치와 속도를 각 부분시스템으로 전달하게 된다.

$$\Phi_{\mathbf{u}_0}^{\mathbf{p}_0} \dot{\mathbf{u}}_0 = -\Phi_{\mathbf{v}_0}^{\mathbf{p}_0} \dot{\mathbf{v}}_0 \quad (10)$$

각 부분시스템에서는 기준 물체의 보정된 7개 좌표를 모두 독립 좌표로 간주하고 각 부분시스템의 좌표계를 6 개를 종속 좌표와 1 개의 독립좌표로 분할하여 식 (11)과 같이 6 개의 종속 좌표가 각 부분시스템의 오일러 매개변수 구속조건식과 조인트 구속조건식을 만족하도록 종속좌표를 보정한다. 본 논문에서는 각각의 현수링크 z 좌표를 독립좌표로 선정하였다.

$$\begin{aligned} \Phi_{\mathbf{u}_i} \Delta \mathbf{u}_i^{(k)} &= -\Phi_i \\ \mathbf{u}_i^{(k+1)} &= \mathbf{u}_i^{(k)} + \Delta \mathbf{u}_i^{(k)} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi \\ \Phi^{\mathbf{p}_i} \end{bmatrix}$$

다음으로 기준 물체와 마찬가지로 각 부분시스템에 대해서도 식 (12)와 같이 각 부분시스템의 오일러 매개변수 속도 구속조건식과 조인트 속도 구속조건식을 만족하도록 보정해 준다.

$$\Phi_{\mathbf{u}_i} \dot{\mathbf{u}}_i = -\Phi_{\mathbf{v}_i} \dot{\mathbf{v}}_i \quad (12)$$

기준 물체와 각 부분시스템의 위치와 속도를 보정을 한 후 식 (6)~(7)과 같은 각 부분시스템의 효과 관성 행렬과 효과 힘 벡터를 계산하여 기준 물체에 전달하여 식 (5)의 기준 물체 운동방정식을 통해 기준 물체의 가속도를 계산한다. 계산된 기준 물체의 가속도를 각 부분시스템으로 다시 전달하여 식 (4)를 통해 각 부분시스템의 가속도를

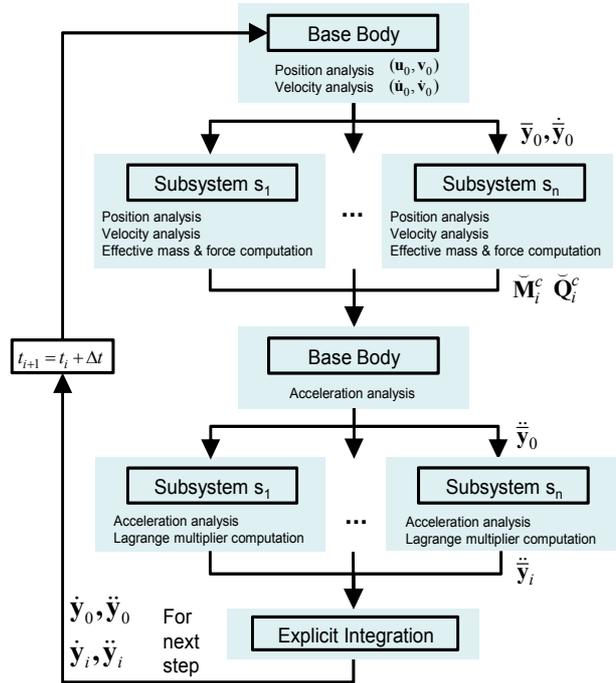


Fig. 4 Computational flow of GCP method based on subsystem synthesis method

계산할 수 있다.

부분시스템 합성방법 기반의 일반 좌표 분할기법 계산 흐름도는 Fig. 4 에 나타내었다.

4. 부분시스템 합성방법 기반 구속조건식 안정화기법

구속조건식 안정화기법은 구속조건식을 두 번 미분한 가속도 구속조건식에 대한 오른쪽 항(γ)을 보정하는 방법이다.

부분시스템 합성방법에 구속조건식 안정화기법을 적용하면 기준 물체의 오일러 매개변수 구속조건식과 각 부분시스템의 오일러 매개변수 구속조건식 및 조인트 구속조건식을 두 번 미분한 식의 오른쪽 항을 보정하게 되어 기준 물체와 각 부분시스템에 독립적으로 적용하게 된다.

기준 물체의 오일러 매개변수 구속조건식을 두 번 미분한 식의 오른쪽 항을 보정하는 방법은 식 (13)과 같다.

$$\hat{\gamma}^{\mathbf{p}_0} = \gamma^{\mathbf{p}_0} - 2\alpha \dot{\Phi}^{\mathbf{p}_0} - \beta^2 \Phi^{\mathbf{p}_0} \quad (13)$$

식 (13)에서 보정된 오른쪽 항($\hat{\gamma}^{\mathbf{p}_0}$)은 식 (2)의 운동방정식의 기존 오른쪽 항($\gamma^{\mathbf{p}_0}$)대신 사용된다.

각 부분시스템의 오일러 매개변수 구속조건식과 조인트 구속조건식을 두 번 미분한 식의 오른쪽

항을 보정하는 방법은 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}^{P_i} &= \gamma^{P_i} - 2\alpha\dot{\Phi}^{P_i} - \beta^2\Phi^{P_i} \\ \hat{\gamma} &= \gamma - 2\alpha\dot{\Phi} - \beta^2\Phi \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)에서 오일러 매개변수에 관한 보정된 오른쪽 항($\hat{\gamma}^{P_i}$)은 식 (2)의 운동방정식에 기존 오른쪽 항(γ^{P_i}) 대신에 사용되며 조인트 구속조건식에 관한 보정된 오른쪽 항($\hat{\gamma}$)은 식 (7)의 효과 힘 벡터와 식 (4)의 부분시스템 운동방정식에 적용되어 식 (15)~(16)과 같이 보정된다. 또한 본 논문에 사용된 보정계수는 가장 효율성이 높은 $\alpha = \beta = 5$ 를 사용하였다.

$$\bar{Q}_i^c = \Phi_{\bar{y}_i}^T (\Phi_{\bar{y}_i} \bar{M}_i^{-1} \Phi_{\bar{y}_i}^T)^{-1} (\hat{\gamma} - \Phi_{\bar{y}_i} \bar{M}_i^{-1} \bar{Q}_i) \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_i & \Phi_{\bar{y}_i}^T \\ \Phi_{\bar{y}_i} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\bar{y}}_i \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_i \\ \hat{\gamma} - \Phi_{\bar{y}_i} \ddot{\bar{y}}_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

따라서 보정된 식 (15)와 식 (6)을 식 (5)에 대입하여 기준 물체의 가속도를 구하고 계산된 기준 물체의 가속도를 이용하여 식 (16)을 통해 각 부분시스템의 가속도를 구할 수 있다.

구속조건식 안정화기법은 일반 좌표 분할기법에 비하여 보정이 간단하고 알고리즘 적용에 쉬워 보다 효율적으로 계산 할 수 있다. 하지만 구속조건식을 직접적으로 계산하지 않으므로 해의 정확성이 일반 좌표 분할기법보다 떨어질 수 있는 문제점이 있다.

부분시스템 합성방법 기반의 구속조건식 안정화 기법 계산 흐름도는 Fig. 5에 나타내었다.

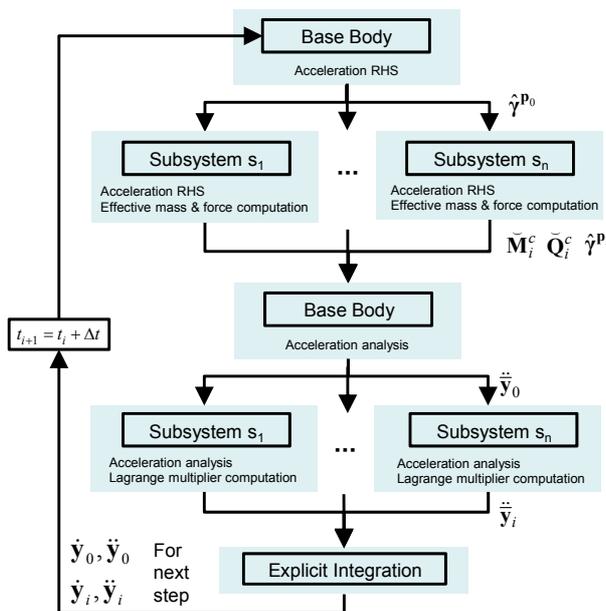


Fig. 5 Computational flow of CS method based on subsystem synthesis method

5. 무인 국방 로봇 시뮬레이션

일반 좌표 분할기법과 구속조건식 안정화기법을 비교하기 위하여 무인 국방 로봇 모델을 개발하고 10km/h의 속도로 PSD D 등급의 험지 주행 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 두 가지 DAE 해석기법의 효과를 비교하기 위해서 직접 적분방법(즉, $\alpha = \beta = 0$ 인 경우)과 비교하여 해의 정확성에 대하여 고찰하였다.

Fig. 6은 무인 국방 로봇의 전차량 시뮬레이션 결과이며, 차체(chassis)의 수직방향 위치와 일반 좌표 분할기법을 기준으로 구속조건식 안정화기법과 직접 적분방법의 오차를 나타낸다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 구속조건식 안정화 기법과 일반 좌표 분할기법은 거의 동일한 해가 산출된 것에 비해 직접 적분방법은 시간이 흐를수록 오차가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 해의 정확성 측면에서 직접 적분방법은 적합하지 않고, 구속조건식 안정화기법 또는 일반 좌표 분할기법을 이용해야만 정확한 해석이 수행될 수 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7은 전차량 모델의 오른쪽 뒷부분 현수장치의 회전 조인트에 대한 미분대수방정식 해석기법에 따른 조인트 구속조건식 오차벡터 최대 norm의 결과를 나타내고 있다. 직접 적분방법은 오차가 계속 증가하여 시간이 많이 흐른 뒤에는 발산하는 결과가 산출될 것으로 예상된다. 반면 구속조건식 안정화 기법은 구속조건식의 최대오차가

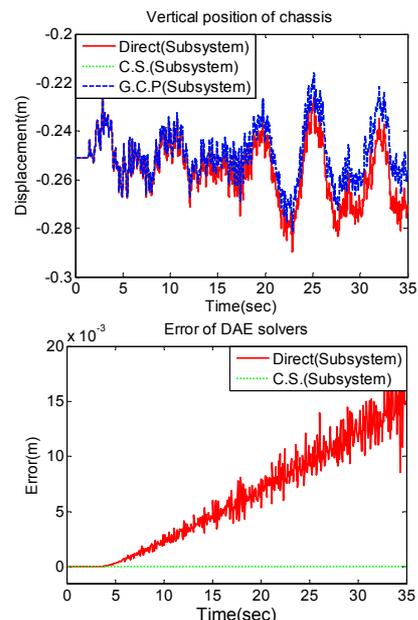


Fig. 6 Comparison of Direct, GCP and CS methods

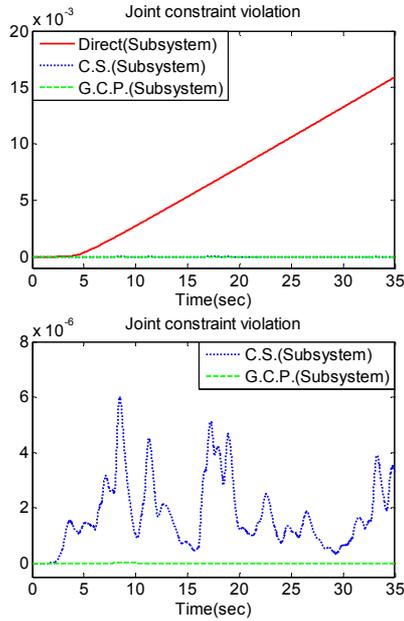


Fig. 7 Constraint violation of the right-rear revolute joint

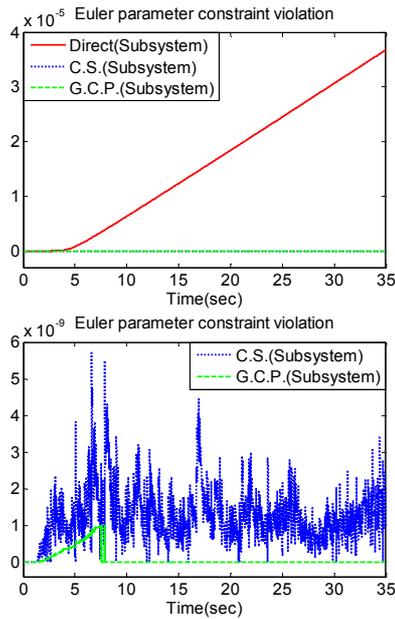


Fig. 8 Euler parameter constraint violation of the chassis

6.0×10^{-6} 으로 비교적 오차가 적고, 일반 좌표 분할기법은 Newton-Raphson 허용 오차를 10^{-3} 으로 하였을 경우 구속조건식의 최대오차가 9.8×10^{-9} 으로 매우 정확한 해가 산출된 것을 알 수 있다.

Fig. 8 은 차체의 오일러 매개변수 구속조건식 오차를 나타낸다. 직접 적분방법은 회전 조인트의 경우와 마찬가지로 오차가 계속 증가하여 부정확한 해가 산출되는 것을 알 수 있다. 반면에 구속조건식 안정화기법의 오일러 매개변수 구속조건식 최대 오차는 5.7×10^{-8} 으로 비교적 적은 오차의

Table 2 CPU time to simulation

	Conventional	Subsystem	Subsystem efficiency
Direct (Sim./CPU)	94.275s (269.357%)	9.130s (26.086%)	1 : 0.097
C.S (Sim./CPU)	94.497s (269.940%)	9.190s (26.257%)	1 : 0.097
G.C.P (Sim./CPU)	105.058s (300.166%)	10.670s (30.486%)	1 : 0.102
Ratio	1 : 1.002 : 1.114	1 : 1.007 : 1.169	

해가 산출된 것을 알 수 있다. 일반 좌표 분할기법의 경우에는 Newton-Raphson 허용 오차를 10^{-3} 으로 하였을 경우 오일러 매개변수 구속조건식의 최대 오차가 1×10^{-8} 으로 보다 정확한 해석이 수행된 것을 확인하였다.

Table 2 는 각 DAE 해석 기법에 따른 계산에 필요한 CPU 시간을 측정한 결과이다. 사용된 PC의 사양은 Intel Core™ i5 3.40 GHz Quad core CPU, 4GB RAM 을 이용하였다.

괄호 안의 %는 시뮬레이션 시간과 CPU 시간의 비율을 나타낸다. 일반적인 해석기법은 모두 250% 이상의 값으로 실시간보다 2.7~3 배 느린 것을 알 수 있다. 하지만 부분시스템 합성방법의 경우 26~30% 로 실시간보다 빠르게 계산되는 것을 알 수 있다. 또한 같은 부분시스템 합성방법 내에서의 DAE 해석기법에 따른 CPU 시간은 표의 Ratio 부분에 표기된 바와 같이 일반 좌표 분할기법이 구속조건식 안정화기법에 비해서 1.17 배 느리지만 크게 차이가 나지 않으므로 부분시스템 합성방법 기반의 일반 좌표 분할기법에 빠르게 해석되면서 정확한 해석이 이루어질 수 있는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 효과적인 무인 국방 로봇의 해석을 위하여 부분시스템 합성방법의 직접 적분방법과 일반 좌표 분할기법 및 구속조건식 안정화기법을 제시하고, 시뮬레이션을 통하여 세가지 방법의 정확성을 비교하였다. 무인 국방 로봇의 험지 주행 시뮬레이션 결과 직접 적분방법은 오차가 누적되어 부정확한 해석이 수행되는 것을 알 수 있었고, 구속조건식 안정화기법은 효율적으로 계산할 수 있지만 일반 좌표 분할기법에 비하여 상대적으

로 오차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 반면에 일반 좌표 분할기법은 복잡한 구속조건식을 계산해야 하지만 구속조건식과 속도 구속조건식을 모두 만족하여 정확한 해석이 수행되는 것을 알 수 있었다. 또한 계산에 필요한 CPU 시간을 일반적인 DAE 해석기법들과 비교하였을 경우 부분시스템 합성방법을 이용하였을 경우에만 실시간 해석이 가능한 것을 확인하였고, 일반 좌표 분할기법을 이용할 경우에 정확하면서도 빠르게 해석이 가능한 것을 확인하였다.

따라서 오일러 매개변수를 사용하여 3 차원 직교좌표 모델의 정확하고 효율적인 실시간 해석을 위해서는 부분시스템 합성방법의 일반 좌표 분할기법을 이용하여 미분대수 방정식을 계산해야 빠르면서도 안정적인 해가 산출되는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 국방무인화 기술 특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Yoo, W. S., Cho, D. H., Lee, J. H. and Yi, K. C., 2010, "Maneuvering Speed of an Off-road Autonomous

Vehicle," *Proceedings of MOVIC*.
 (2) Jeon, S. H., Lee, J. H. and Yoo, W. S., 2011, "Improvement of Maneuvering Stability of a 6x6 Vehicle using Control Schemes," *Multibody dynamics*.
 (3) Lee, J. H. and Yoo, W. S., 2011, "Velocity Decision for Unmanned Ground Vehicle Considering Road Roughness," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, pp.973~975.
 (4) Kim, S. S., 2002, "A Subsystem Synthesis Method for Efficient Vehicle Multibody Dynamics," *Multibody System Dynamics*, Vol. 7, pp. 189~207.
 (5) Kim, S. S., Jo, J. Y., Jeong, W. H. and Wang, J. H., 2011, "Multibody Vehicle Dynamics Analysis using an Explicit-Implicit Integrator with Subsystem Synthesis Method," *Proceedings of the ASME*.
 (6) Han, J. B., Jeong, W. H., Kim, S. S., 2010, "Subsystem Synthesis Method Based on Cartesian Coordinates for Unmanned Military Robot Multibody Dynamics," *The Asian Conference on Multibody Dynamics*.
 (7) Haug, E. J., 1989, *Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems*, Vol. 1, Allyn and Bacon.
 (8) Baumgarte, J., 1972, "Stabilization of Constraints and Integrals of Motion," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 1, pp. 1~16.
 (9) Wehage, R. A. and Haug, E. J., 1982, "Generalized Coordinate Partitioning for Dimension Reduction in Analysis of Constrained Dynamic System," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 104, No.1, pp. 247~255.