

アクティブ制御による幼児拘束装置の安全性向上

Safety Improvement of Child Restraint System by using Adoptive Control

小泉孝之(同志社大) 辻内伸好(同志社大)

○ 伊藤伸(同志社大院)

Takayuki KOIZUMI, Doshisha University
Nobutaka TSUJIUCHI, Doshisha University
Shin ITO, Graduate School, Doshisha University

Abstract: Wearing a child restraint system (CRS) greatly improves the crash-safety of children. However, the number of children's injuries in traffic accidents hasn't decreased. Therefore much further improvement of CRS is requested. Recently, active control of restraint systems for occupants has been studied to improve crash-safety and their effectiveness has been shown. We proposed active harness control for CRS and showed its effectiveness. We constructed a simulation model without harness control. It consists of a child dummy model and a CRS model. We attached a mechanism that changed the harness length in the CRS model. Additionally, we constructed a control system. In this system, harness force is feed backed and the controller changes the belt length for keeping harness force constant in car crashes. Simulations were executed and the injury risks were decreased compared to the model without control of the harness. Thus we clarified the effectiveness of active control of CRS in numerical simulations.

Key Words: Child Restraint System, Active Control, Crash-Safety, Optimization

1. 諸言

平成23年度の警察庁の統計より、事故の際チャイルドシート(CRS)着用者の死亡重症率は0.72%、非着用者の死亡重症率は2.71%と着用者の3.8倍である⁽¹⁾。この統計よりCRSの使用は自動車事故の被害軽減に有用であることが確認できる。現在自動車衝突時の乗員の安全性への関心が高まっており、CRSの安全性能向上が求められている。近年では自動車衝突の乗員保護性能を向上させるため、衝突時に乗員拘束装置(シートベルト、エアバック等)をアクティブ制御し、衝突の衝撃を吸収する研究が盛んに行われている。また、数多くの論文によって乗員拘束装置のアクティブ制御により保護性能の向上が証明されている⁽²⁾⁽³⁾。本論文では、CRSの安全性能向上のためにCRSのアクティブ制御を提案する。

衝突時にアクティブ制御を行う際、制御方法を決める制御器が必要とされる。本研究ではハーネスの張力が衝突時に一定に制御し、衝撃を緩やかに吸収する制御器を構築した。さらに制御器のパラメータの最適化を遺伝的アルゴリズムを利用して行い、最適化により得られたパラメータを適用した制御器を用いて衝突シミュレーションを実行することで幼児拘束装置のアクティブ制御によりCRSの安全性能が向上する可能性を検証した。

2. 事故事例

自動車衝突時、前面、側面、背面衝突における死傷者数を比較すると前面衝突において最も死傷者数が多いことが確認されている⁽⁴⁾。また、自動車衝突時の負傷部位に着目すると、頭部、頸部における傷害が多いことが確認されている⁽⁵⁾。そのため本研究では前面衝突時における頭部、頸部の傷害危険性を低減することを目的とした。

3. シミュレーションモデル

3-1 コンピュータシミュレーション

衝突に対するCRSの安全性能の評価及び性能向上には、CRSに様々な構造変更を施し膨大な試行が必要とされる。

しかし、このような反復試行を実際の衝突試験で行うことはコストや時間の面から困難である。これに対しコンピュータシミュレーションは繰り返し試行が容易であり、近年では様々な場面で利用されている。本研究ではダミーモデル、CRSモデルの2つのモデルを利用し衝突シミュレーションを行い、アクティブ制御による安全性能向上の可能性を検証した。

3-2 ダミーモデル

ダミーモデルは、衝突試験に利用されているダミー人形HybridIII3歳児ダミーを基にモデル化されている。このモデルはMADYMOデータベース内に存在するものを使用し、3歳児ダミーに対して十分な妥当性を有することが確認されている⁽⁶⁾。モデルは複数の剛体ボディをジョイントで結合したマルチボディモデルであり、このモデルの利点として計算コストが低いことが挙げられる。

3-3 CRSモデル

CRSモデルは、実際のCRSを基にモデル化されており、本体部、3点式ハーネス、ECEテストシートで構成されている。本体部はマルチボディモデル、ハーネスは有限要素モデル、ECEテストシートは2枚の剛体平面である。ハーネスには長さを変化させる機構を付加し、アクティブ制御を可能にした。

3-4 モデルの妥当性検証

シミュレーション結果と実機を用いた衝突試験の結果の比較を先行研究により行っており、それぞれの頭部移動量、CRS移動量、頭部加速度が概ね一致していることからシミュレーションモデルは十分な妥当性を有していることが確認された⁽⁷⁾。これにより、衝突シミュレーションによるCRSの幼児保護性能の評価が可能となった。

4. ハーネス制御器

4-1 制御系

ハーネスの張力をフィードバックしハーネスの長さを制御する制御器を構築する。自動車衝突時、従来ではCRS着用者はハーネスにより一時的に強い拘束力が働き、着用者

への負担となる。そのため本研究では自動車衝突時にハーネスの張力が一定とする制御を行うことで着用者への負担を軽減させる。張力一定の制御を行うため図1の制御器を構築した。この制御器はハーネスの張力と自ら設定した張力の目標値との偏差をフィードバックし、PID制御でハーネスの長さを変化させる。目標値は図2のTarget Valueで表され、荷重付加開始時間、荷重の上限、荷重付加時間の3つの変数で定義した。

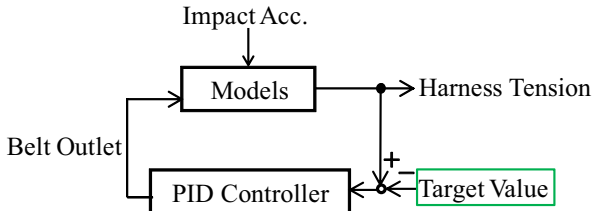


Fig. 1 Block diagram of control

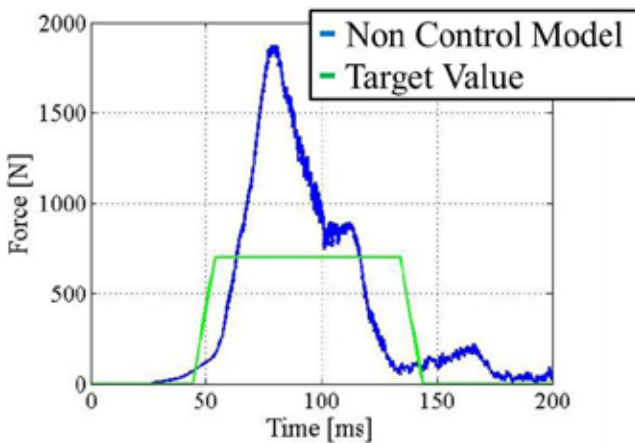


Fig. 2 Target Value for harness force (Green line)

4-2 最適化

4-2-1 目的関数

最適化ソフトウェア modeFRONTIER を利用し、制御器のパラメータであるPIDコントローラのゲイン及び目標値に用いる3変数の決定を行う。頭部の損傷を表す値である頭部傷害値(HIC)及び頸部の損傷を表す値である頸部傷害値(Nij)を最小とする目的関数として最適化を行った。頭部傷害値は36ms間の頭部加速度の積分値であり、これが最大となる値を傷害値として衝突安全の分野で一般的に用いられている。HICは次の式で表される。

$$HIC = \max \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} \right\}$$

式のaは頭部合成加速度である。頸部傷害値は頸部荷重および頸部モーメントから算出され、次の式で表される。

$$Nij = \frac{F_x}{F_{xc}} + \frac{M_y}{M_{yc}}$$

ここでFxは頭部軸方向荷重、Fxcは許容限界荷重、Myは頸部モーメント、Mycは許容限界モーメントである。Nijは頸部の伸張と圧縮、屈曲と伸展の違いによって、許容限界荷重及びモーメントが異なる。Hybrid III 3歳児ダミーモデルに適用する許容限界荷重及びモーメントを表1に示す。

Table 1 Critical values of neck axial force and bending moment of Hybrid III 3-year-old dummy

	Axial force [N]		Moment [Nm]	
	Tension	Compression	Flexion	Extension
Critical value	2340	2120	68	30

頭部及び頸部傷害値の傷害基準値を表2に示す。傷害基準値は傷害値の許容される限界値を表しており、この値を超えると受傷する可能性が高いため、安全装置の設計の際にはこの値を超えないことが求められる。

Table 2 Threshold values of HIC, Nij

	HIC	Nij
Threshold value	1000	1

4-2-2 最適化アルゴリズム

最適化アルゴリズムに遺伝的アルゴリズムを利用した。このアルゴリズムの大きな特徴として、複雑な多峰性、非線形の問題に対しても有効に利用できることが挙げられる。複数の目的関数を持つ多目的最適化を行うことで、複数のパレート最適解が得られる。パレート最適解とは、ほかのすべての解よりも優位であるとは限らないが、その解よりもより優れた解がほかに存在しない解である。このパレート最適解の優劣を判定するため、パレート最適解ごとに出力された頭部、頸部の傷害値を非制御時の値で割り、それらを2乗和したものを評価関数Jと定義した。

$$J = \left(\frac{HIC}{1000} \right)^2 + \left(\frac{Nij}{1.0} \right)^2$$

この評価関数Jが最小となるパレート最適解を选好解として選択した。この选好解を制御器のパラメータとして用いて制御器を設計した。

5. 衝突シミュレーション

5-1 シミュレーション条件

ハーネスの制御を行わない非制御モデル、アクティブ制御を行う制御モデルのそれぞれに対し衝突シミュレーションを実行した。CRSモデルに幼児ダミーモデルを着座させ、スレッド試験規格に準拠した衝突加速度を入力することでスレッド試験を模擬した。

また、シミュレーションの拘束条件としてハーネスの長さの変化の限界値を0.1mとした。この限界値を設定することにより幼児がCRSから飛び出す危険を防止した。

5-2 シミュレーション結果

非制御モデル、制御モデルの両モデルにおけるt=0, 40, 80, 120ms時の挙動比較を図3に示す。また、両モデルにおけるハーネスの張力、頭部加速度、頸部荷重、頸部モーメント、頭部移動量の比較を図4(a)~(e)に示す。またハーネスの長さの変化を図5に示す。非制御モデル、制御モデルにおける頭部及び頸部傷害値の比較を表3に示す。

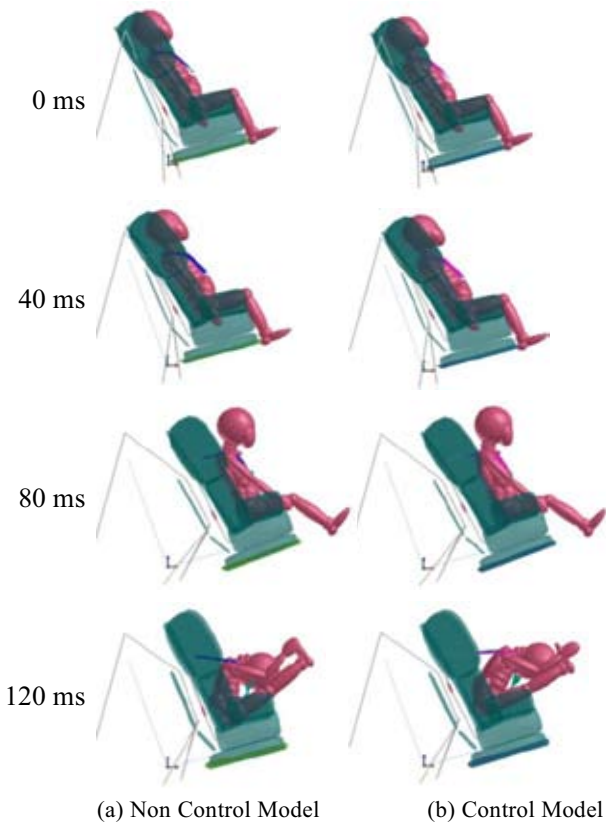
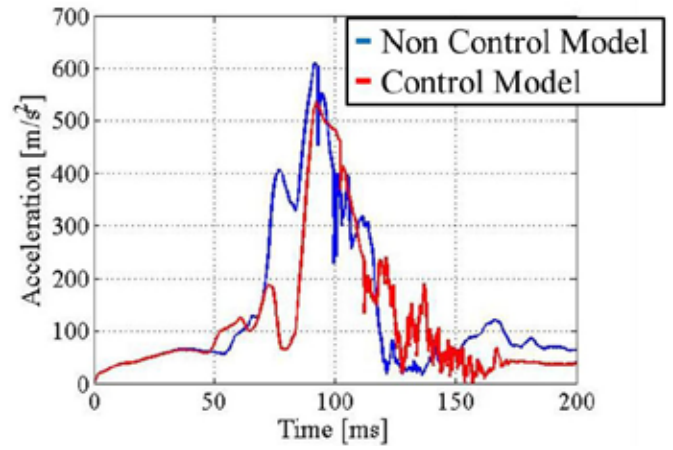
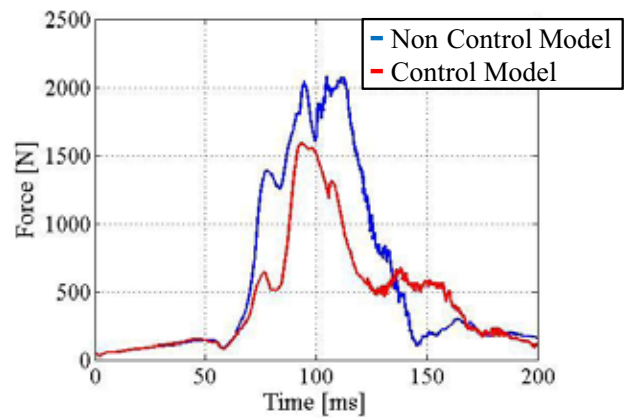


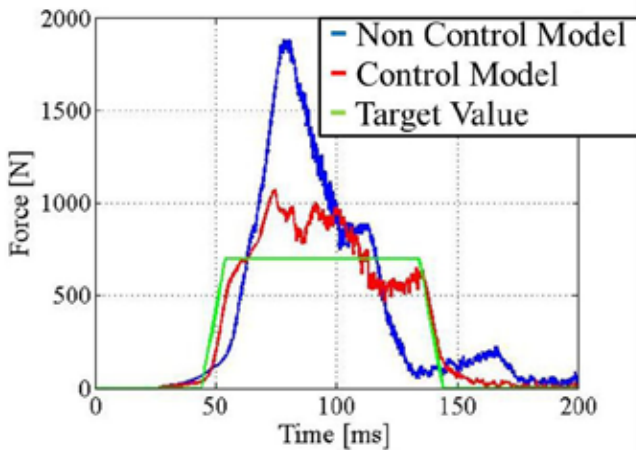
Fig. 3 Comparison of behavior between the Non Control and Control Models



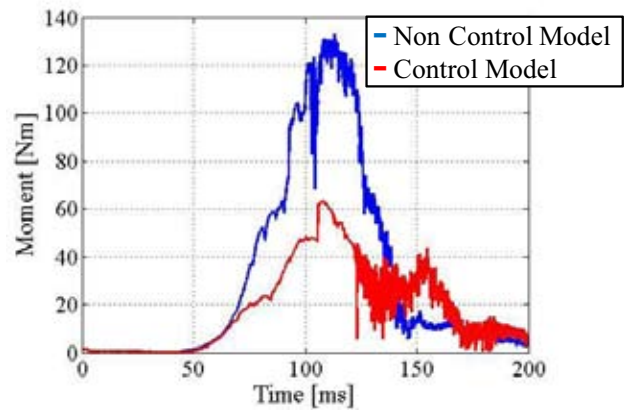
(b) Head Resultant Acceleration



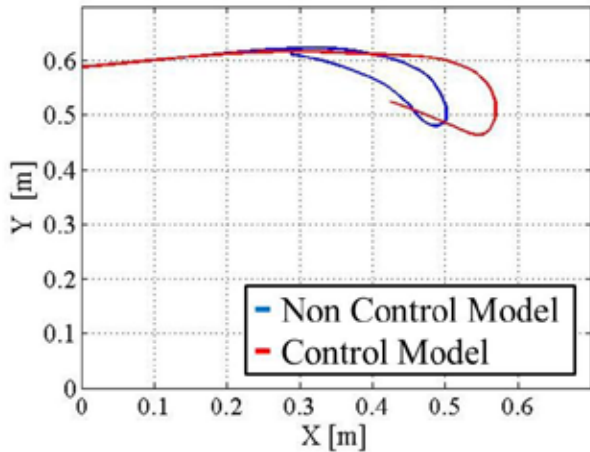
(c) Neck Axial Force



(a) Harness Force



(d) Neck Moment



(e) Head Travel Distance
Fig. 4 Comparison of results in Non Control and Control Model

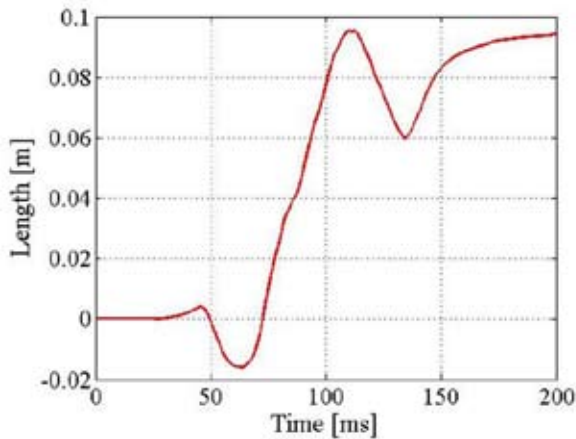


Fig. 5 Harness Length

Table 3 Injury values in Non Control Model and Control Model

	HIC	Nij
Non control model	596	2.91
Control model	318	1.62
Ratio of decrease [%]	47	44

5-2-1 ハーネスの張力

図 4(a)より, 非制御モデルと比較し制御モデルではハーネスの最大張力が 1879N から 1068N となり 811N 減少した。また, 70~130ms においてハーネスの張力が目標値に近い波形を示した。

5-2-2 頭部傷害, 頸部傷害

図 4(b)より非制御モデルと比較し制御モデルでは 90ms における頭部加速度の最大値が 635m/s^2 から 551m/s^2 となり 84m/s^2 減少した。そのため頭部加速度から算出される頭部傷害値は非制御モデルでは 596 なのに対し制御モデルでは 318 となり 47%減少した。

図 4(c)より非制御モデルと比較し制御モデルでは 90ms

における頸部荷重の最大値が 2081N から 1594N となり 487N 減少した。また, 図 4(d)より非制御モデルと比較し制御モデルでは 90ms における頸部モーメントの最大値が 133Nm から 64Nm となり 69Nm 減少した。そのため頸部荷重, 頸部モーメントから算出される頸部傷害値は非制御モデルでは 2.91 なのに対し制御モデルでは 1.62 となり 44%減少した。

衝突時にハーネスを制御することにより頭部及び頸部の傷害値が減少しており, アクティブ制御を行うことによる幼児保護性能の向上をシミュレーションにより明らかにした。

5-2-3 頭部移動量, ハーネス制御量

図 4(e)より非制御モデルと比較し制御モデルでは X 座標方向の頭部移動量が 0.502m から 0.569m と 0.067m 長くなったことが確認された。また, 図 3 より制御を行うことにより幼児が CRS から飛び出すことはなく, ハーネスの長さの変化の限界値を 0.1m とした拘束条件が問題ないことが確認できた。

図 5 よりハーネスの張力が目標値を上回る 60~110ms, 130ms~200ms ではハーネスを掃き出し, ハーネスの張力が目標値を下回る 45~60ms, 110~130ms ではハーネスを巻き取る制御を行っていることが確認できた。

6. 結言

- (1) ハーネスの張力を一定とする制御を行うことで衝突による衝撃を緩やかに吸収する制御器を構築した。
- (2) アクティブ制御により頭部及び頸部の傷害を低減でき, CRS の幼児保護性能が向上する可能性を示した。

7. 謝辞

なお本研究の一部は, 日本学術振興会科学研究費補助金基礎研究(c) (課題番号: 23560272) の援助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 警察庁, チャイルドシート使用有無別交通事故関連統計, http://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku/childseat/statistical_chart_table.pdf, (参照 2011-09-10).
- (2) Gabriella Griotto, Paul Lemmen, Edwin van den Eijnden, Arjan van Leisen, Cees van Schie and John Cooper, Real Time Control of Restraint Systems in Frontal Crashes, SAE World Congress and Exhibition, (2007).
- (3) Ewout van der Laan, Frans Veldpaus, Bram de Jager, Maarten Steinbuch,, "Control-oriented modeling of occupants in frontal impacts", International Journal of Crashworthiness, Vol.14, No.4, (2009), pp.323-327.
- (4) 吉田良一, 後藤幸子, 森健二, "チャイルドシートが関与した車両事故ITARDAデータの安全解析研究", (社)自動車技術会, 2002年春季大会学術講演会全刷集, No.17-02, (2002), pp.13-16.
- (5) "チャイルドシートの着用効果に関する調査研究報告書", (財)交通事故総合分析センター, (1999), pp.13-21.
- (6) TNO Automotive, MADYMO Theory Manual Version 6.2, (2004).
- (7) ECE Regulation No. 44, Uniform Provision Concerning the Approval of Restraining Devices for Child Occupant of Power-Driven Vehicles.