

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24560279

研究課題名(和文)振り子・倒立振り子供用式チャイルドベッドに関する基礎研究

研究課題名(英文) Basic Research on an In-Car Crib with Joint Application of Regular and Inverted Pendulum Mechanisms

研究代表者

川島 豪 (KAWASHIMA, Takeshi)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号：70186089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：車に乗せられている幼児の安全確保のため、振り子式のチャイルドベッドを倒立振り子のようにアームで支え、その回転減衰を制御することで衝突時の幼児に作用する衝撃力を許容値以下に抑えることのできる安全装置を提案した。衝突初期に衝撃力を緩和できる振り子式と動き出し難さから寝台の移動距離を抑えることのできる倒立振り子式の特徴を併せ持つ点、車上の装置であることからエネルギー消費の少ないセミアクティブ制御を適用した点が特徴である。そしてシミュレーションにより-30Gの衝突加速度を車内の限られた空間内でも-24Gに減らせることなど基礎的なデータを集めて設計指針を得ると共に模型実験によりその有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：To reduce the collision shock and risk of injury to an infant in an in-car crib (or a child safety bed) during a vehicle crash, it is necessary to limit the force acting on the crib below a certain allowable value. To realize this objective, we propose a semi-active in-car crib system with the joint application of regular and inverted pendulum mechanisms. The crib is supported by an arm similar to a pendulum, and the pendulum system itself is supported by an arm similar to an inverted pendulum. In addition, the friction torque of the joint connecting the base and the latter arm is controlled using a brake mechanism to save energy of the vehicle with a limited amount of power. Then, it was clarified by the numerical simulation that the proposed system was able to reduce the collision deceleration of 30G to the crib deceleration of 24G in considering the limited cabin space, and the design guidelines were obtained. The effectiveness was also confirmed by the model experiment.

研究分野：機械工学/機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 衝撃制御 乗員保護装置 幼児用補助装置 衝撃緩和 振り子 倒立振り子 衝突実験装置

1. 研究開始当初の背景

(1) 日本では、職場環境という面から見ると住まいと職場が時間的に離れており、通勤に多くの時間を費やさなければならない状況にある。特に、幼児を抱えながら仕事をしようとする若い世代の親たちは幾多の困難に直面することとなる。このことは、出生率の低下にもつながり、しいては社会保険制度の崩壊の遠因となっている。これを解決するためには、幼児を抱えて働く親たちに生活しやすい環境を整備する必要がある。そこで本研究では、幼児とともに車で外出する機会の多い若い親のライフスタイルを支える技術の1つとして、車内での幼児の安全をより高める装置の開発を目指す。新生児から使える寝台型のチャイルドシートに着目し、衝突時に幼児に作用する衝撃力を、寝台を移動させることで軽減すると共に、衝撃力を背中に集中させることで幼児の姿勢が複雑に乱されることを防ぐ装置の開発を目指す。この装置の開発の課程として、本課題では、この装置を提案し、模型実験により有用性を確認する。

(2) 寝台型チャイルドシートは、座席式に比べて腹部を圧迫しないことから酸素飽和度の低下による脳障害を引き起こす危険性が低いといわれている。しかし、衝突時の衝撃を側面から被ると幼児の体に複雑な力が作用することになる。寝台型チャイルドシートの上部を回転支持した振り子式にし、制御することで、幼児に作用する衝撃力を背中に方向に集中させることができ、姿勢が崩れることを防げる。さらに、衝撃力を零から徐々に作用させることができる。しかし、大きな衝撃力になると、遠心力も加わり、衝突による衝撃力より大きな力が幼児に作用することになる。そこで、座席に固定されたベースの前方を支点に回転するアームで倒立振り子のように振り子式寝台を支え、後方に倒しておく。これにより、小さな衝撃力では動かず、大きな衝撃力で動く寝台とすることができる。そして、倒立振り子式のアームの回転減衰を制御することで幼児に作用する力を一定にすることができる。すなわち、幼児に作用する衝撃力の最大値を幼児に後遺症が残らない程度まで緩和することが可能となる。本研究では、この振り子式と倒立振り子式を組み合わせた寝台型チャイルドシートを提案する。

(3) 衝突時の幼児へのダメージを軽減する目的でチャイルドシートを回転させるシステムとしては、衝撃時にチャイルドシートを電磁石によりスライド回転させることで子供が自分のおしりで衝突時の体重を支えることのできるチャイルドシートが実用新案(田村孝一、回転安全チャイルドシート、実用新案登録第3068346号)として登録されている。また、衝突の虞が検知されると同時に座面を揺動させて衝突前に幼児に対する車両衝突

の影響を確実に効果的に低減できる位置に動かすチャイルドシートの特許(大野光由他3名、車両のチャイルドシート装置、特開2001-225680)が公開されている。これらの提案ではチャイルドシートを衝突前に動力を用いて動かし、衝撃力を臀部で受け止められるように位置決めしているが、本課題で提案している装置では、使用できるエネルギーが限られている車用であることを考慮してセミアクティブ制御を採用しているとともに振り子・倒立振り子併用式とすることにより幼児に作用する衝撃力を徐々に大きくして一定にしている点が特徴である。

(4) 幼児が背中で衝撃を受け止める寝台に関しては、研究代表者が平成12年度~14年度に科学研究費補助金(基盤研究(C)(2):12650236)を受けて「救急自動車用強制振り子式寝台の開発」を実施した際に開発した経験があり、その効果は確認されている。また倒立振り子式の腕を制御する衝撃制御に関しては、W. D. Pilkeyらが、胸部の加速度、胸部の変形、乗員の車内での移動距離を許容値内に抑えるシートベルト張力の生成法を非線形な人間-車両系に対して求めている¹⁾。さらに、自動車における乗員保護の観点から、ボディーにクラッシュプルゾーンが設けられたり、シートベルトやエアバックが設置されたりしている。加えて、幼児の乗車に関してはチャイルドシートの装着が義務化されている。

しかし、これらのシステムはパッシブもしくはオープンループシステムで外乱などの影響により期待される効果が得られない場合がある。効果を確実なものにするには、状態を瞬時にフィードバックする衝撃制御システムが必要となる。フィードバックループを有したアクティブ衝撃制御に関しては下郷、西村らの、最適制御、H制御による衝撃制御に関する研究²⁾がある。一方、アクチュエータの小型化が可能で、制御に多くのパワー必要としないセミアクティブ衝撃制御に関しては、研究代表者によるブレーキシステムを有するセミアクティブ衝撃制御用アクチュエータを用いた研究³⁾がある。さらに研究代表者はこれをベースに平成15年度~17年度に科学研究費補助金(基盤研究(C):12650236)を受けて「肺と肋骨の相対速度に注目したシートベルト張力制御装置の開発」においてアクティブシートベルトを提案し、模型実験によりその実現可能性を明らかにしている。本課題はこれらの研究実績をベースに、安心・安全な社会を目指し、次世代を担う子供達を交通事故から救うことを願って着想されたものである。

<引用文献>

D. V. Balandin, N. N. Bolotnik and W. D. Pilkey, "Optimal Protection From Impact, Shock, and Vibration", Gordon

and Breach Science Publishers, 2001.
王徳彰・西村秀和・下郷太郎、衝撃のアクティブ制御（LQI 制御とH 制御の適用）、日本機械学会論文集 C 編、Vol.71, No.704, 2005, pp.1223-1230.
川島豪、セミアクティブ衝撃制御に関する研究、日本機械学会論文集 C 編、Vol.71, No.705, 2005, pp.1521-1528.

2. 研究の目的

(1) 本課題では、振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドの実現に向け、与えられた衝突速度により車内という移動距離が制限された状況で効果が得られるアームの長さや初期位置等の基礎的なデータを数値シミュレーションにより集め、設計指針を得る。さらに、本学自動車棟の衝突実験用 20 m の走路に設置されているリニア誘導モータ（LIM）を制御するための制御系を構築し、60 kg 程度の台車を再現性のある一定の減速度で止められるようにする。そして、台車に搭載する 1/10 程度のスケールのチャイルドベッドモデルを製作し、提案するシステムの有効性を実験により確認する。最後に、実際に衝突壁に衝突させてその有用性を確認する。

(2) 提案するチャイルドベッドにより、幼児が衝撃力を常に背中を受け止められる点、衝撃力がゼロから増加し、一定値となるように制御することで幼児に作用する衝撃力を許容値内に抑えられる点、車用であることからベッドの移動距離を考慮している点が本課題の独創的な点である。加えて、パワーが限られている車上システムであることを鑑み、アクチュエータが直接衝撃力を発生するアクティブ衝撃制御ではなく、セミアクティブ衝撃制御システムを用いることで制御に必要なパワー（制御コスト）を抑えている点も特徴である。これにより、幼児を抱えて働く親たちの生活環境の改善が期待でき、出生率の改善に貢献できるとともに、毎日、幼児を乗せて運転する親の心的負担を軽減できることから事故発生確率そのものを低下させられる効果も期待できる。

3. 研究の方法

(1) 衝突の際、幼児の背中に衝撃力を作用させることで体が複雑に曲がることを防ぎ、衝撃力がゼロから徐々に増加して一定値に抑えることのできる振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドを提案し、スライディングモード制御理論を適用して制御則を導いた。

(2) 次に、機構解析ソフトウェアを用いて衝突を模擬した数値シミュレーションを実施して実物大の振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドの有効性を車内で寝台が移動できる距離を考慮しながら確認した。そして、各アームの長さおよび比による影響を明らかにし、設計指針を得ると共に、制御パラメ

ータによる影響を確認し、その設計法を確立した。実験用の模型についてもシミュレーションを実施し、模型の設計に反映させた。提案しているチャイルドベッドのように寝台がベースに対して動くものは技術基準（年少者用補助乗車装置（チャイルドシート）の技術基準など）で想定されておらず、技術基準を満たさないが、数値シミュレーションでは、このようなシステムによりどこまで衝撃力を効果的に緩和できるか明らかにした。

(3) 提案した振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドの有効性を確認するため模型実験を実施するが、衝突実験において、模型を搭載した台車を毎回衝突させていたのでは緩衝材のばらつきにより減速度が変化して結果の比較が難しい。そこで同一条件下で実験をするため、LIM により減速させることとし、本学自動車棟に設置してある衝突実験装置の LIM の制御システムを構築した。

(4) 本研究の特徴である衝突という 0.1 s 程度の短時間での制御を実現するため、0.001 s のサンプリング周期に応答するセミアクティブ衝撃制御用アクチュエータを製作した。

(5) 振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドの 1/10 スケールの模型を製作して台車に搭載し、衝撃制御用アクチュエータを駆動するセミアクティブ制御系を構築した。

(6) 制御実験を実施し、振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドの有効性を確認した。寝台上における衝撃力が徐々に大きくなるか、衝撃力の低減効果がどの程度まで達成できているかを確認した。

4. 研究成果

(1) 衝突時に幼児に作用する衝撃力を軽減する装置として、一般的に提案されている振り子式でなく、図 1 に示す振り子式寝台をベース前方で回転支持された倒立振り子のように回転するアームで支えることで、上下方向の動きを抑えた振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドを提案した。本システムは世界的に見ても独自のシステムである。

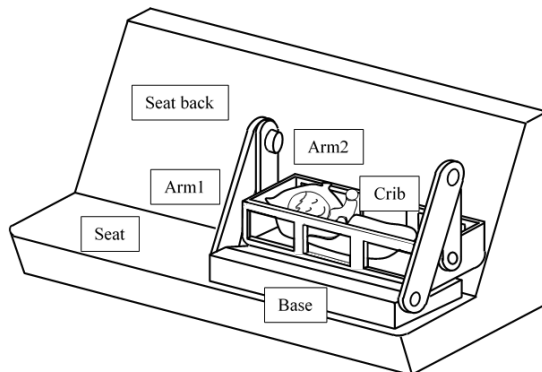


図 1 振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッド概念図

そして、目標とする加速度から求めたアームの変位に追従させる制御法と直接目標加速度に追従させる制御法を、スライディングモード制御理論を適用して構築した。変位に追従させる方法は安定した制御が可能であるが目標軌道を必要とする。一方、加速度制御はシンプルであるが制御に積分器を含み安定性に注意が必要となる。

(2) 次に、制御則を含む振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドの有効性をミニバンの車内で寝台が移動できる距離を考慮しながら衝突を模擬した制御シミュレーションにより確認し、設計資料を得た。計算例として倒立振り子アームと振り子アームの角度差を一定とし、倒立振り子の回転摩擦を加速度制御したシミュレーションのモデルを図2に、結果を図3(a)に、誤差を(b)に示す。

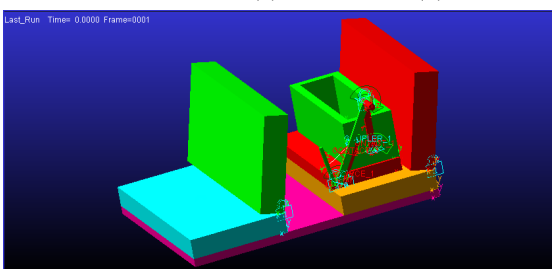
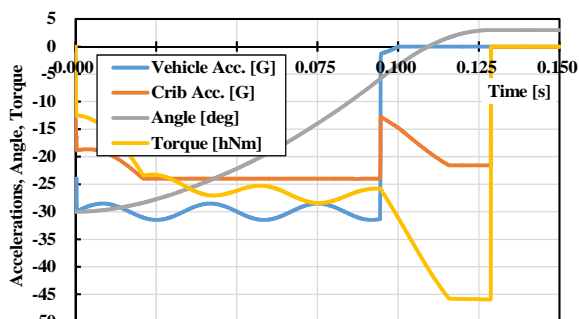
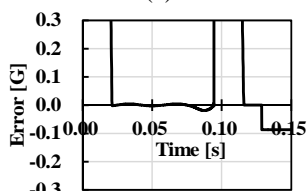


図2 制御シミュレーション用モデル



(a)



(b)

図3 制御シミュレーション結果

車両の減速度はクラッシュブルゾーンにより 30 G に抑えられるとし、寝台の目標水平減速度を 24 G に設定した場合であり、車両減速度には外乱を加えている。外乱を含む車両加速度を青色実線、チャイルドベッドの水平加速度を赤色実線、倒立振り子の角度を灰色実線、制御トルクを黄色実線で示す。制御入力の変動して外乱を打ち消しながら約 30 度のアーム回転により、積分器の初期値の関係で零からではないが寝台水平加速度を徐々に大きくして目標値に収束させており、

提案したチャイルドベッドシステムの有効性および車両加速度に対するロバスト性を確認した。以上の結果より、ミニバンの車内空間を考慮しながら寝台を移動させることにより、寝台の水平方向加速度を 20% 程度小さくできることを明らかにした。

(3) 振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドの模型実験において再現性のある実験ができるよう、本学自動車棟の衝突実験装置に設置されている LIM に関して、前後に設置してある赤外線測距センサで台車を検出し、リレーにより必要な LIM のみに通電するシステム、さらに台車の位置を走路端に設置したレーザー変位計で検出し、DA コンバータと AD コンバータを搭載したパソコン (DSP) で LIM 用インバータを制御して台車の最高速度と減速度を制御するシステムを構築した。衝突実験用走路の写真を図4に示す。溝の中に緑色の LIM が設置され、LIM の手前に黒いソリッドステートリレー (SSR) が設置されている。走路上の質量 30 kg の台車を加速後、約 6.5 m/s の速度から約 19 m/s² で減速させることができる性能である。実験結果の一例を図5に示す。台車振動の発達を抑えるため加速後直ちに減速させている。なお、加速度データに強いフィルタを使用しているため、変化に多少の遅れが生じている。



図4 衝突実験用リニア誘導モータ (LIM)

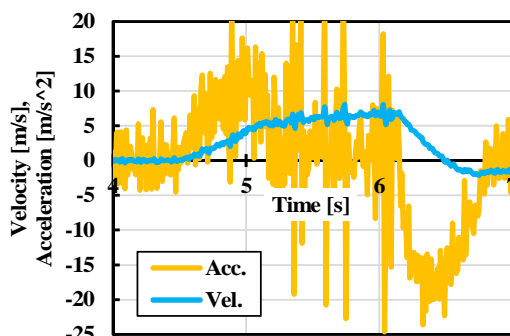


図5 台車の速度と加速度の時刻歴

(4) セミアクティブ衝撃制御用アクチュエータに関して、まず車用であることを考慮し電流形の超磁歪アクチュエータでブレーキシューを押しディスクに制動トルクを発生させるアクチュエータを製作したが、ストロークが小さくディスクブレーキに力を有効に

伝えられなかった。次に積層圧電アクチュエータを用いて製作し、ステップ応答において 1 ms で目標値の 63.2 % 以上になることを確認した。さらに軽量化が必要な台車で駆動するため軽量かつ 12 V の電池で駆動できるアンプを 2 台使用することとし、アンプの出力電流を補うために静電容量の小さい積層圧電アクチュエータを 2 本直列に配置して各々を別々のアンプで駆動する構成に改良した。その結果、ステップ応答において 1 ms でほぼ目標値まで応答するアクチュエータを製作することができた。なお、外装の樹脂が薄い積層圧電アクチュエータが入手できたことも直列接続が実現できた一因である。

製作したアクチュエータの写真を図 6 に、自然落下で回転させている長さ 30 cm のアームを 1 本の積層圧電アクチュエータで停止させた結果を図 7 に示す。ステップ状に制御信号（紫色太線）が入力されると、圧電アクチュエータ用アンプの出力（黄緑色実線）およびディスクブレーキのパッドを押し付ける力（赤色実線）が少し遅れて立ち上がり、アーム先端加速度（青色太線）が 1 ms 以内に最大値を記録しており、衝撃制御用アクチュエータとしての有効性を確認できる。なお、アーム先端の加速度が振動しているのは僅かなバックラッシュによるものである。

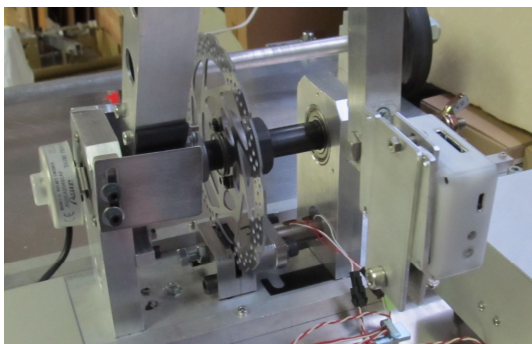


図 6 衝撃制御用アクチュエータ

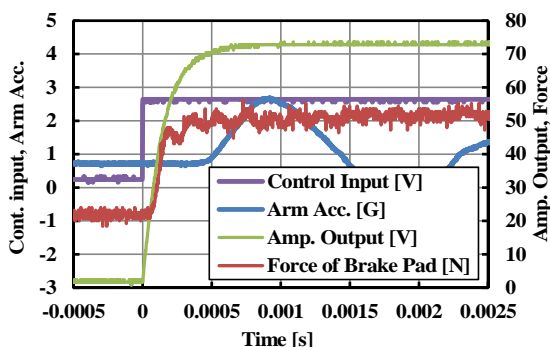


図 7 衝撃用アクチュエータの応答性能

(5) 台車とベッドの動きを加速度計で、アームの角変位をロータリエンコーダでセンシングし、AD コンバータおよびアップダウンカウンタを介して DSP に入力し、インプリメントされた制御則により制御入力を計算し、DA コンバータを介して衝撃制御用アクチュ

エータを駆動するセミアクティブ制御系、および製作された振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドの約 1/10 スケールの模型を台車に搭載した実験模型の写真を図 8 に示す。台車は底に取り付けたアルミ板と LIM の空隙を一定に保つためにサスペンションを用いていないが、積層圧電アクチュエータ用アンプは防振ゴムで支持している。

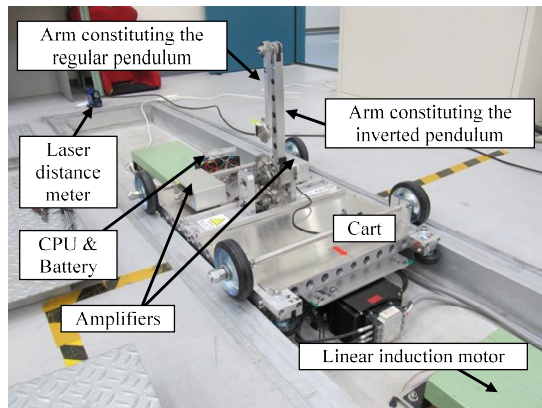


図 8 振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッド実験模型

(6) 振り子・倒立振り子併用式チャイルドベッドの有用性を確認するため、寝台模型を搭載した質量 30 kg の台車を加速後、約 6.5 m/s の速度から約 19 m/s² で減速させた場合の実験結果を図 9 と 10 に示す。図 9 はアームを自由に回転させた場合で、図 10 は加速度制御した場合である。

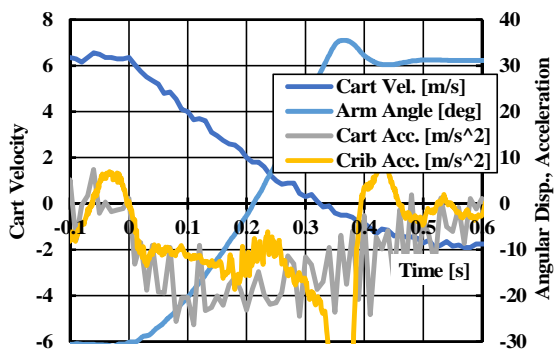


図 9 模型実験結果
(アームを自由回転させた場合)

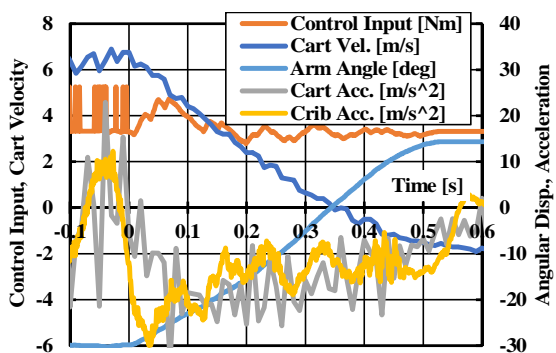


図 10 模型実験結果
(加速度制御した場合)

制御入力を赤色実線、台車速度を紺色実線、アーム回転角を青色実線、台車加速度を灰色実線、寝台水平加速度を黄色実線で示している。アームを自由に回転させた場合は寝台水平加速度を約 10 m/s^2 まで抑えられるが、アームが-30 から 30 度まで回転してストッパーに衝突し、大きな衝撃力（加速度）が生じている。制限された車内空間における衝撃緩和を実現できておらず、制御を必要とすることが確認できる。寝台の加速度をスライディングモード制御した場合は、アームが-30 から 15 度まで回転し、最初は目標値を超えてしまうが、振動は残るものの目標値の 12 m/s^2 程度に抑えられており、制御の有効性が確認できる。

これらの結果より、本研究で独自に提案された振り子式幼児補助装置と倒立振り子式の利点を併せ持つ振り子・倒立振り子供用式チャイルドベッドおよびその制御系の有効性が確認でき、測定データの処理に改良を要するが衝突という 0.1 s 程度の極短時間における制御の実現可能性も示すことができた。

(7) LIM による減速では衝突後に台車を止められない。そこで、設計してある 19 m/s^2 の減速度を実現できるインパクトアッテネータを製作し、本学自動車棟に設置してある衝突壁に設置して実際に台車を衝突させる実験を実施し、振り子・倒立振り子供用式チャイルドベッドの実現性を確認することが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Takeshi Kawashima, Simulation Study on an Acceleration Control System for Semi-Active In-Car Crib with Joint Application of Regular and inverted pendulum Mechanisms, Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal, 査読有, J-STAGE Advance Publication, 2017, pp. 1-11, DOI: 10.1299/mej.17-00027

Takeshi Kawashima, Control system for semi-active in-car crib with joint application of regular and inverted pendulum mechanisms, Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol. 2, No. 3, 2015, pp. 1-12, DOI: 10.1299/mej.14-00557

川島 豪, 振り子・倒立振り子供用式セミアクティブチャイルドベッドに関する基礎研究(機構の提案と制御システムの開発), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 80, No. 812, 2014, pp. 1-11, DOI: 10.1299/transjsme.2014trans0073

[学会発表](計6件)

Takeshi Kawashima, Simulation Study on an Acceleration Control System for Semi-Active In-Car Crib with Joint Application of Regular and inverted pendulum Mechanisms, The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics, 7-10 August 2016, 金沢都ホテル(石川県金沢市)

Takeshi Kawashima, Acceleration control system for semi-active in-car crib with joint application of regular and inverted pendulum mechanisms, The XIII International Conference on Motion and Vibration Control, 査読有, 3-6 July 2016, University of Southampton, Southampton, UK.

川島 豪, 振り子・倒立振り子供用式チャイルドベッド型セミアクティブ幼児保護装置に関する基礎研究: 模型実験による性能の確認, 日本機械学会 第14回「運動と振動の制御」シンポジウム, 2015年6月22~24日, 栃木県総合文化センター(栃木県宇都宮市)

Takeshi Kawashima, Basic research on semi-active child-car bed with joint application of regular and inverted pendulum mechanisms -Study on the control system-, The 12th International Conference on Motion and Vibration Control, 査読有, 3-7 August 2014, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)

川島 豪, 振り子・倒立振り子供用式セミアクティブチャイルドベッドに関する基礎研究(制御システムの開発), 日本機械学会 第13回「運動と振動の制御」シンポジウム, 2013年8月27~30日, 九州産業大学(福岡県福岡市)

Takeshi Kawashima, Research on Semiactive Child-Car Bed with Joint Application of Regular and Inverted Pendulum Mechanisms, The 6th Asian Conference on Multibody Dynamics, 26-30 August 2012, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China.

[その他]

ホームページ等

川島研究室ホームページ

「2. 車の乗員保護装置(チャイルドシート等)に関する研究」

<http://www.me.kanagawa-it.ac.jp/kawashima/Study.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川島 豪 (KAWASHIMA Takeshi)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号: 70186089