

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17993

研究課題名(和文) 歩行者保護を目的とした無人搬送車の衝突安全

研究課題名(英文) Crash safety of unmanned vehicles for pedestrian protection

研究代表者

成川 輝真 (Narukawa, Terumasa)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50424205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：歩道などで小型無人搬送車を運用する場合、衝突事故時に歩行者を保護するための極めて高い衝突安全性能が求められる。本研究では、小型軽量のアクチュエータで所望の力を発生し、かつ、故障した際にも最低限の衝突安全性能を確保するために、小型サーボモータとボールねじにより駆動されるテーブルに対して、弾性要素を直列に配置した直列弾性アクチュエータを用いて能動的に制御を行うアクティブバンパを提案した。被衝突物の最大変形量を最小とする最適なモータトルクを算出し、このアクティブバンパが高い衝突安全性能を有することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Small unmanned vehicles moving on sidewalks must have high collision safety in order to avoid injury when collision accidents with pedestrians occur. In this study, we proposed an active bumper with a series elastic actuator in order to generate a desired force applied to the bumper and ensure collision safety performance even in case of failure of the active bumper. The series elastic actuator consists of an elastic element in series with a table driven by a ball screw and servo motor. The optimal motor torque for minimizing the maximum deflection of the object of the collision is derived, and it is shown that the active bumper with the series elastic actuator have high collision safety.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：衝突安全 歩行者保護 アクティブバンパ 直列弾性アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

交通業界や物流業界において自動運転車や無人搬送車により人や荷物を搬送する技術が進歩しており、障害物や歩行者との衝突を回避する方法について数多くの研究が行われてきた^①。しかし、歩道や建物内で移動する小型無人搬送車では歩行者との接触事故を完全に無くすことは非常に困難である。したがって、無人搬送車が安全に運用されるためには、歩行者と接触した際に歩行者に怪我を負わせないような高い衝突安全性能が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、歩道や建物内などを移動する小型無人搬送車が歩行者と衝突した際に歩行者に怪我を負わせない手段として、接触力を能動的に制御するアクティブバンパを提案し、その衝突安全性能を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 直列弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパを設計する。アクティブバンパに用いるアクチュエータは、所望の力を発生し、かつ軽量であること、制御なしでも最低限の衝突安全性能が得られることが必要である。所望の発生力を実現するためには、例えば接触力をフィードバックして力制御を行うことが考えられるが、衝突のように短時間での現象が支配的な場合には、アクチュエータ側の慣性が大きい機構は不向きである。また、制御が行えない場合に最低限の衝突安全性能を満足することは難しい。そこで、本研究では、小型軽量のアクチュエータで所望の力を発生し、かつ、故障した場合にも最低限の衝突安全性能を確保するために、小型サーボモータとボールねじにより駆動されるテーブルに対して、弾性要素を直列に配置した直列弾性アクチュエータ^②を採用する。直列弾性アクチュエータはこれまでも様々な対象への適用例がある^{③④}。

(2) アクティブバンパの最適発生力を算出する。自動車の衝突安全において、従来では受動的な方法で乗員を拘束していたのに対し、能動的に拘束力を制御することで乗員の傷害を低減する方法が提案されている^{⑤⑥⑦}。本研究ではこれら先行研究の方法に基づき、被衝突物の最大変形量を最小とするアクティブバンパの最適発生力を算出する。まず、アクティブバンパが所望の発生力を与えるような理想的なモデルにおいて被衝突物の最大変形力を最小とする発生力を算出する。次に、直列弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパにおいて被衝突物の最大変形量を最小にする直列弾性アクチュエータのモータトルクを算出する。ただし、最適なモータトルクの算出において実機への適用可能性を担保するために二つの制約を設ける。

一つ目の制約はアクティブバンパの移動量についてのものであり、二つ目の制約はモータの発生トルクについてのものである。

(3) パッシブバンパと比較することで衝突安全性能の評価を行う。本研究で提案するアクティブバンパが高い衝突安全性能を有することを示すために、弾性要素のみで構成されたパッシブバンパを用いたときとアクティブバンパを用いたときとで被衝突物の変形量を比較する。特に、アクティブバンパは無人搬送車が歩行者と衝突したときの衝突速度に応じてモータトルクの与え方を変化させることができることが利点であることから、複数の衝突速度において衝突安全性能を比較する。

(4) アクティブバンパの製作を行う。小型サーボモータとボールねじにより駆動されるテーブルに対して、弾性要素を直列に配置した直列弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパを製作する。所望のバンパ発生力を実現するために、直列に配置された弾性要素の変形量が測定可能なように計測装置を設置する。アクティブバンパの寸法は小型無人搬送車への搭載を想定する。

4. 研究成果

(1) 直列弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパを設計するためにモデル化を行った。直列弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパが搭載された無人搬送車と歩行者を簡易的に表した被衝突物を図1に示すような力学モデルとして表した。

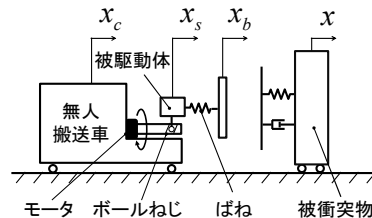


図1 直列弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパのモデル

直列弾性アクチュエータはトルク τ を発生させてボールねじを駆動するサーボモータ、慣性モーメント I 、リード l のボールねじ、ボールねじにより駆動される質量 m_s の被駆動体、被衝突物に接触する質量 m_b のバンパ、被駆動体とバンパとの間に配置されるばね定数 k_s の線形ばねで構成される。質量 m_c の車体と質量 m の被衝突物は図1の左右方向にのみ移動する。被衝突物のばね定数は k 、減衰係数は c とする。車体変位を x_c 、被駆動体の変位を x_s 、バンパの変位を x_b 、被衝突物の変位を x とすると、質量 m_b のバンパに作用するアクティブバンパの発生力 f は、ばねの変形量 $x_s - x_b$ とばね定数 k_s の積で決まる。したがって、サーボモータによりボールねじを駆動し被駆動体の位置を制御することで、所

望のバンパ発生力を得ることができる。

(2) アクティブバンパの最適発生力を算出した。まず、図2に示すようにアクティブバンパが所望の発生力 f を与えるような理想的なモデルにおいて被衝突物の最大変形力を最小とする発生力を算出した。ただし、アクティブバンパの相対移動量と発生力 f に制約を与えた。最適化手法では状態方程式を離散化して線形計画法を用いた。

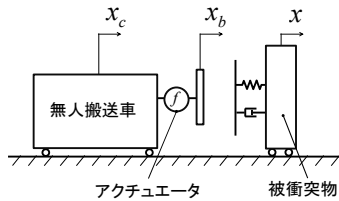


図2 所望の発生力を与えるアクティブバンパのモデル

図3に最適化により得られた被衝突物の最大変形量を最小化するアクティブバンパの発生力および被衝突物の変形量を示す。衝突直後に大きな発生力を与え、かつ被衝突物の変形量が最大値付近で一定となるようにすることで結果として最大変形量を低減できることを明らかにした。

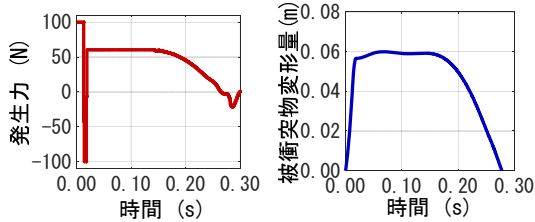


図3 最適な発生力 f と被衝突物の変形量

次に図1で示した直列弾性アクチュエータによるアクティブバンパを用いたときに被衝突物の最大変形量が最小となるモータトルク τ を算出した。ただし、アクティブバンパの最大相対移動量 d^{\max} とモータトルクの最小値 τ^{\min} と最大値 τ^{\max} に制約を与え、状態方程式を離散化して線形計画法を用いることで最適なモータトルクを算出した。

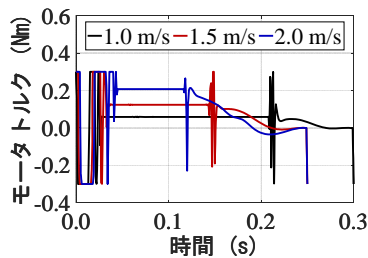


図4 異なる衝突速度での最適トルク

図4に衝突速度が1.0 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/sのときに被衝突物の最大変形量を最小にするモータトルクの算出結果を示す。ただし、アクティブバンパと被衝突物のパラメータ

の値は表1に示すものを用いた。

表1 パラメータ

m_c	14.6 kg	c	100 Ns/m
m_s	0.2 kg	I	$5 \times 10^{-6} \text{ kg m}^2$
m_b	0.2 kg	l	0.01 m
m	10 kg	d^{\max}	0.1 m
k_s	10000 N/m	τ^{\min}	-0.3 Nm
k	5000 N/m	τ^{\max}	0.3 Nm

(3) 弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパはパッシブバンパと比較して高い衝突安全性能を有することを示した。パッシブバンパでは図5に示すようにバンパに線形ばねが取り付けられている。パッシブバンパで用いた線形ばねは衝突速度2.0 m/sのときにバンパ移動量の制約を満たし、かつ、被衝突物の最大変形量が最小となるばね定数のものとした。図6に直列弾性アクチュエータによるアクティブバンパを用いたときの被衝突物の変形量とパッシブバンパを用いたときの被衝突物の変形量の比較結果を示す。

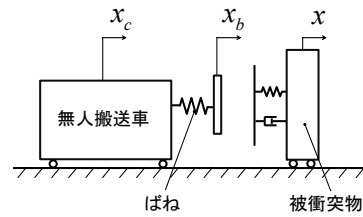
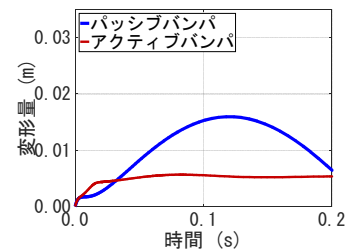
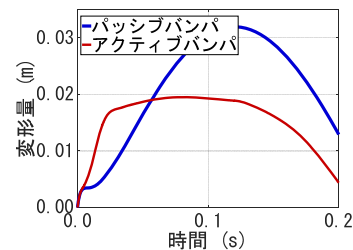


図5 パッシブバンパのモデル



(a) 衝突速度 1.0 m/s



(b) 衝突速度 2.0 m/s

図6 変形量の比較

被衝突物の最大変形量に着目すると、衝突速度が1.0 m/sのときでは直列弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパはパッシブバンパと比較して65%低減できており、衝突速度が2.0 m/sではアクティブバンパはパッシブバンパと比較して39%低減できている。

これにより、異なる衝突速度においてもアクティブバンパを用いることで高い衝突安全性が得られることを明らかにした。次に直列弾性アクチュエータの剛性の影響について検討し、直列弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパが高い耐故障性を有するためには適切な剛性を与える必要があり、このときアクティブバンパが故障したとしても被衝突物の最大変形量の大幅な増加が見られないことを確認した。これにより、直列弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパの衝突安全性および耐故障性についての有用性を明らかにした。

(4) 直列弾性アクチュエータを用いたアクティブバンパを製作した。製作したアクティブバンパを図7に示す。サーボモータにはモータの回転角度を計測するエンコーダが取り付けられており、エンコーダにより算出したモータの回転角度を変換することでボールねじにより駆動される被駆動体の移動量を測定する。被駆動体にはレーザ変位計が取り付けられており、レーザ変位形によりボールねじの被駆動体を基準としたバンパの変位が測定できるため、これによりボールねじの被駆動体とバンパの間に直列に配置されたコイルばねの変形量が測定し、バンパの発生力が推定できる。バンパ部分を除くと直列弾性アクチュエータの横幅は0.1 m程度であり、直列弾性アクチュエータの小型化を実現した。

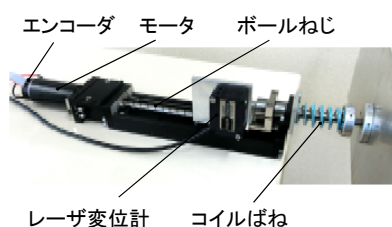


図7 製作したアクティブバンパ

<引用文献>

- ① 永井正夫, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, カー・ロボティクス, ZMPパブリッシング, 2010.
- ② Pratt, G.A. and Williamson, M.M., Series elastic actuators, IEEE/RSJ Int. Conf. IROS, Vol. 1, pp. 399-406, 1995.
- ③ Zinn, M., Roth, B. and Khatib, O., A new actuation approach for human friendly robot design, International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 4-5, pp. 379-398, 2004.
- ④ Kong, K., Bae, J. and Tomizuka, M., A compact rotary series elastic actuator for human assistive systems, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 17, No. 2, pp. 288-297, 2012.
- ⑤ 加藤誠, 西村秀和, 天野洋一, 下郷太郎, アクティブニーボルスターによる乗員下

肢の損傷低減制御, 日本機械学会論文集C編, Vol. 73, No. 736, pp. 3185-3192, 2007.

- ⑥ Kato, M., Nishimura, H. and Shimogo, T., Injury Protection of Occupant's Legs with Feedback Control for Active Knee Bolster, Review of Automotive Engineering, Vol. 29, pp. 357-361, 2008.
- ⑦ 成川輝真, 西村秀和, 伊藤優一, 本澤養樹, 胸部変形に着目した低次元力学モデルを用いた車両衝突時の乗員拘束方法の検討, 日本機械学会論文集C編, Vol. 79, No. 801, pp. 1396-1405, 2013.

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)

[学会発表] (計3件)

- ① Terumasa Narukawa, Tomoki Tsuge, Hiroshi Yamamoto, Takahiro Suzuki, Design of an Active Bumper with a Series Elastic Actuator for Pedestrian Protection of Small Unmanned Vehicles, Proceedings of the XIII International Conference on Motion and Vibration Control, International Conference on Motion and Vibration Control, 2504, 2016.
- ② Terumasa Narukawa, Tomoki Tsuge, Hiroshi Yamamoto, Takahiro Suzuki, Optimal Control of an Active Bumper with a Series Elastic Actuator for Crash Safety of Small Unmanned Vehicles, The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics, pp. 294-295, 2016.
- ③ 成川輝真, 柘植智輝, 山本浩, 鈴木隆広, 歩行者保護を目的とした小型無人搬送車用アクティブバンパの設計, Dynamics and Design Conference 2016, 424, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成川 輝真 (NARUKAWA, Terumasa)
 埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
 研究者番号: 50424205