T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ヘビ型ロボットの首持上げ高さ最大化手法の提案
Title	
著者(和文)	古村 博隆, 山田 浩也, 遠藤 玄, 福島 文彦
Authors	Hirotaka Komura, Hiroya Yamada, Gen Endo, EDWARDO FUMIHIKO FUKUSHIMA
出典 / Citation	日本ロボット学会学術講演会, , , 1M3-08
Citation(English)	, , , 1M3-08
発行日 / Pub. date	2013, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2013 The Robotics Society of Japan.

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

ヘビ型ロボットの首持上げ高さ最大化手法の提案

○古村博隆(東工大)　山田浩也(東工大)　遠藤玄(東工大)　福島 E.文彦(東工大)

1. 緒言

ヘビ型ロボットにおける先端頭部節の持上げ可能高さは，頭部節にカメラなど周辺環境を観測するセンサを搭載した場合[1]に見える範囲を広げたり，より高い段差を踏破したりする時など，非常に重要なパラメータの一つとなる．本研究では，上記のようなヘビ型ロボットのハードウェアとしての能力を限界まで引き出す方法の一つとして，首持上げ高さの最大化手法を提案し，シミュレーションにより確認する．

2. 提案手法の提案

2.1. 条件の設定

問題の簡略化のため，準静定運動を想定する．想定するヘビ型ロボットは一定間隔l[m]でピッチ軸関節を持つ．この関節の可動域は$\pm\theta_{MAX}$であり，最大出力はT_{MAX}[Nm]であり，出力トルクをT_{out}[Nm]と表記する．また各節はすべて質量m[kg]で質量中心が節の中央に位置する等価なものである．

図 1 にヘビ型ロボットの首持上げの例を示す．図 1 (a)のように A 点から B 点にかけて最大関節角度で円弧状になる場合を考えて，図 1 (b)のように関節持上げ数をM，AB 間の円弧部の関節数を N とすれば，

$$\frac{\pi/2}{\theta_{MAX}} \le N < \frac{\pi/2}{\theta_{MAX}} + 1 \qquad \cdots(1)$$

$0 < i \le N$の範囲内において，U_iを次式で定義する．

$$U_i = \frac{(i\text{番と }0\text{ 番の関節の}x\text{方向距離})}{l} = \sum_{j=1}^{i} cos((j-1)\theta_{MAX}) \qquad \cdots(2)$$

これを用いて，さらにQ_{arc}を次式で定義する．

$$Q_{arc} = \frac{(0\sim N\text{関節による A 点へのトルク})}{mgl} = \left(\sum_{i=1}^{N}\left(U_{i-1} + \frac{1}{2}\cos i\theta_{MAX}\right)\right) \qquad \cdots(3)$$

2.2. 提案手法

本論文では，新たに図 1 (b)の N 番以降の関節を動かし重心位置を調整し，必要トルク軽減をすることと更に仕事をする必要のない関節では，駆動機構の外部からの力に対して保持するトルク(保持トルク)を利用することを提案する．一般に保持トルクは出力トルクよりも高いので，T_{MAX}以上の高トルクで保持できることも利用する．

3. 提案手法の比較

3.1. 垂直上昇時の持上げ数限界

図 2(a)に垂直上昇時の外観を示す．ヘビ型ロボットの最大屈曲角で円弧状に曲がり，後は直線状に伸ばしていく方法である．図 2 (b)の A 点を水平状態から屈曲させる瞬間が必要トルク最大であると考え，この点を検証する．

A 点におけるT_{out}は円弧部の$0\sim N$関節によるものと直線部の$N\sim M$関節によるものの和となるので，次式で表される．

$$T_{out} = mgl\left(Q_{arc} + U_N(M-N)\right) \Leftrightarrow M = N + \frac{1}{mglU_N}T_{out} - \frac{Q_{arc}}{U_N} \qquad \cdots(4)$$

(4)式にT_{MAX}を代入すれば，持上げ可能数がわかる．

また，各関節の制御手法として，連続曲線近似法[2]を用いた．この時の曲率$\kappa_p(s)$は次式で表される．

$$\kappa_p(s) = \begin{cases} \dfrac{\theta_{MAX}}{l} & \left(0 \le s \le \dfrac{\pi l}{2\theta_{MAX}}\right) \\ 0 & (other) \end{cases} \qquad \cdots(5)$$

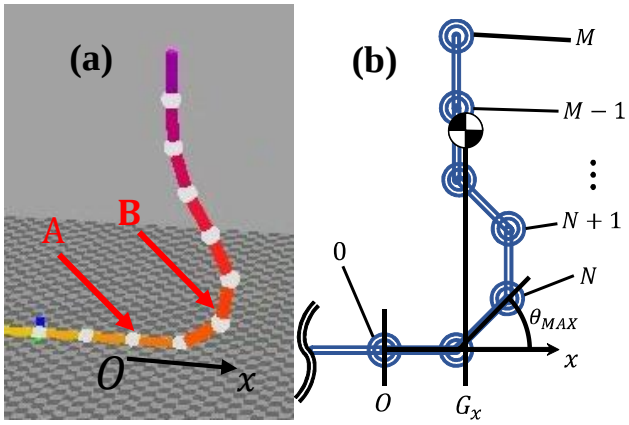

図 1 提案手法による ヘビ型ロボットの首持上げ例

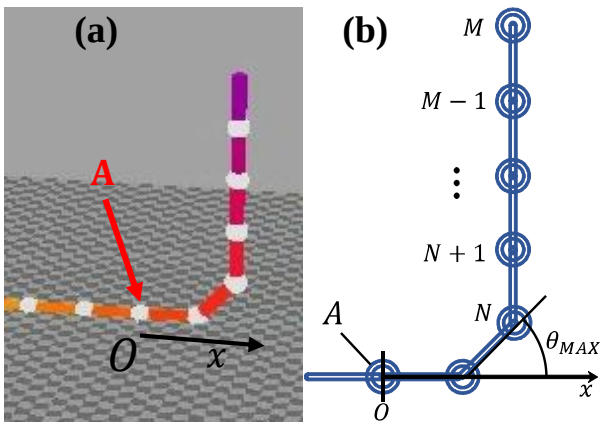

図 2 垂直持上げの外観

3.2. 提案手法による持上げ数限界

図 1(b)の N~M 節の質量の重心の座標をG_xとする．これから A 点及び B 点の出力トルクをそれぞれT_A，T_Bとすれば，次式が成り立つ．

$$\begin{cases} T_A = mg\left(lQ_{arc} + G_x(M-N)\right) \\ T_B = mg(lU_N - G_x)(M-N) \end{cases} \quad \text{...(6)}$$

また B 点においては駆動機構が仕事をする必要がないので，保持トルク以内であれば問題ない．ここで，保持トルクと出力トルクの比を$\mu(\mu<1)$と定義する．これにより$T_A = T_{MAX}$，$T_B = T_{MAX}/\mu$の時がもっとも持上げ数が大きいので，(6)式に代入して解けば，

$$G_x = \frac{\mu l U_N}{1+\mu}\left(1 - \frac{mglQ_{arc}}{(1+\mu)T_{MAX} - \mu mglQ_{arc}}\right) \quad \text{...(7)}$$

$$M = N + \frac{1+\mu}{\mu mglU_N}T_{MAX} - \frac{Q_{arc}}{U_N} \quad \text{...(8)}$$

(8)式と(4)式にT_{MAX}を代入した値の右辺の差は，

$$(9) - (4) = \frac{\mathrm{T_{MAX}}}{\mu mglU_N} > 0 \quad \text{...(9)}$$

この式から持上げ数 M が増加されることがわかる．

また，こちらでは連続曲線近似法によるシフト制御ではなく重心制御方法として次のようなアルゴリズムを用いた．

- 図 3 中の B 点に隣接する C 点において，重心位置を補正する方向へ関節を動かす．ただし，この時出力トルクが不足する場合は C 点を保持し，一つずつ上の関節について同様のことを行う．
- 持上げ動作をする A 点において出力トルクが不足する場合は持上げ動作を停止し，重心移動完了を待つ．
- C 以上の関節について，図 4 のように関節が反って干渉を起こさないようにx軸に対する絶対角度を常に45°~135°以内に収まるように制限．
- 目標数の関節を持上げきった後，許容する絶対角度を90°~135°になるように徐々に小さくすることで，首の高さを高める．

4. シミュレータによる各手法の実験

2 節で述べた体幹持上げ数の妥当性を準静力学的なシミュレーションによって確認した．シミュレーションに用いたパラメータを次に示す．

$$m = 1[\mathrm{kg}] \quad \theta_{MAX} = 45° \quad l = 1[\mathrm{m}] \quad \mu = 0.5 \quad T_{MAX} = 70[\mathrm{Nm}] \quad \text{...(10)}$$

また，これらの値から諸定数が計算できて，

$$U_N = 1.707 \quad N = 2 \quad Q_{arc} = 1.354 \quad \text{...(11)}$$

4.1. 垂直上昇によるシミュレーション結果

式(4),(10),(11)から，

$$M = 5.4 \quad \text{...(12)}$$

よって，5 節まで持上げ可能であると考えられる．

また，シミュレーションの様子を図 5 に示す．

また，この時の負荷トルクの変化の様子を図 6 に示す．図中の番号は持ち上げた順番を現している．負のピークは，それぞれ A 点において関節の持ち上げ始めにかかるトルクである．

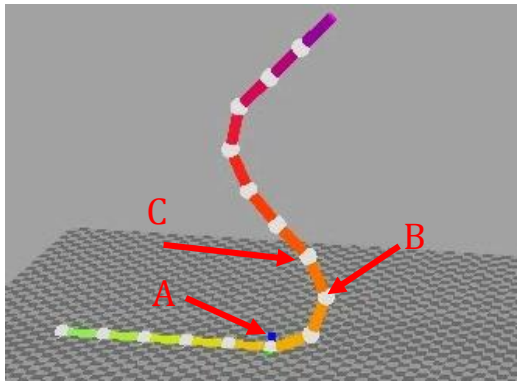

図 3 提案手法外観

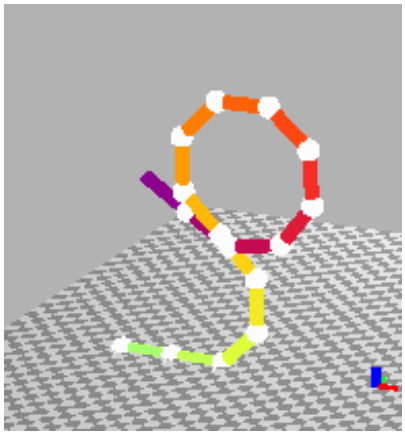

図 4 関節の干渉の例

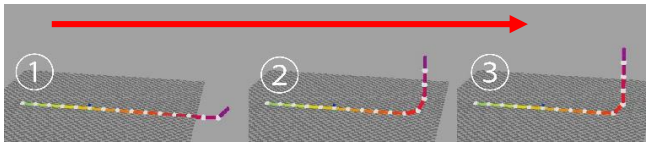

図 5 垂直持上げの様子

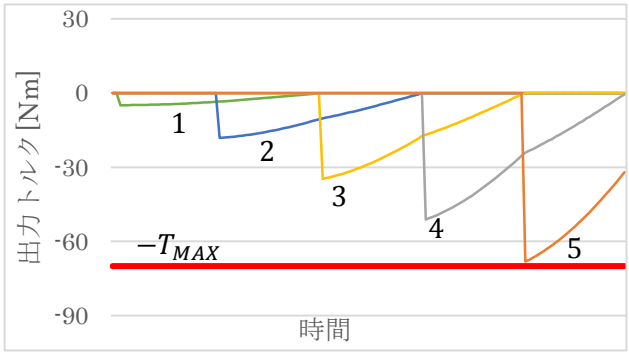

図 6 垂直持上げのトルクの変化

4.2. 提案手法によるシミュレーション結果

式(10),(11),(12)から,

$$M = 13.7 \quad \text{...(13)}$$

よって，13 節まで持上げ可能であると考えられる．シミュレーションの様子**エラー! 参照元が見つかりません。**に示す．また，この時のトルク変化の様子を図 8 に示す．

9 節目持上げ以降，持上げ時に最大トルクよりも大きな値がかかっている．この場合でも，保持トルク以下であるために保持が可能である．この間に 3.2 節で述べたアルゴリズムに従って重心移動を行い，そちらが完了次第持上げ動作に入る．9 節目持上げ時のこの節への負荷トルク及び角速度を図 9 に示す．

図 9 から，最大出力トルクを超えているときは角速度を 0 とし，重心移動により除荷されてから動作を開始することがわかる．

4.1. シミュレーション結果まとめ

表 1 にシミュレーションより得られた結果を示す．

今回シミュレーションを行った条件において，提案手法により垂直上昇に比べて倍以上の大幅な持上げ数の向上が確認できた．これは，実用上非常に大きな意味を持つと考えられる．

5. 結論と今後の課題

ヘビ型ロボットの首持上げ高さをより高められる手法を提案し，シミュレーションによりその妥当性を示した．

今後の課題として，提案手法の実機での実証実験が考えられる．また，今回の提案手法では関節を持ち上げる毎に重心調整を行うために動作に時間がかかる問題がある．今後はより拘束な運動制御ができるようアルゴリズムを改善してゆく．

参 考 文 献

[1] 河野健太郎，山田浩也, and 広瀬茂男, “高い荒地踏破性を有する 能動節能動車輪型ヘビ型ロボット ACM-R4.2 の開発,” *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012*, pp. 2A1–P07, 2012.

[2] H. Yamada and S. Hirose, “索状能動体の研究－多関節体幹による連続曲線近似法－,” 日本ロボット学会誌, vol. 26, no. No.1, p. 110〜120, 2008.

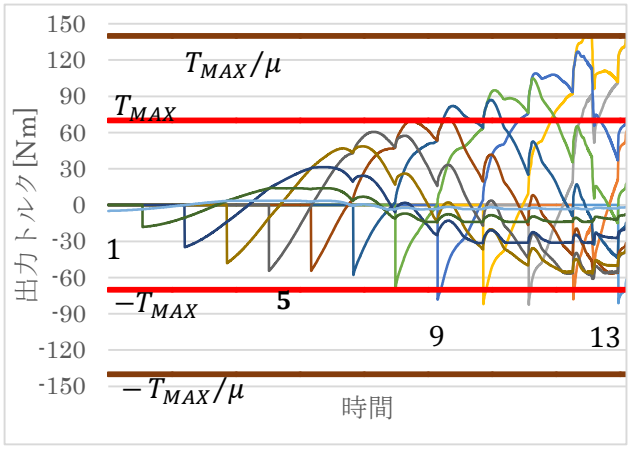

図 8 提案手法による持上げ時のトルク変化

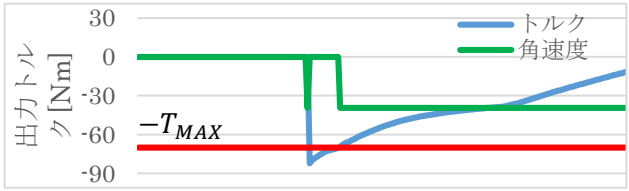

図 9 持ち上げ始め時のトルク及び角速度の変化

表 1 シミュレーション結果

手法	M	持上げ数
垂直上昇	5.4	5
提案手法	13.7	13

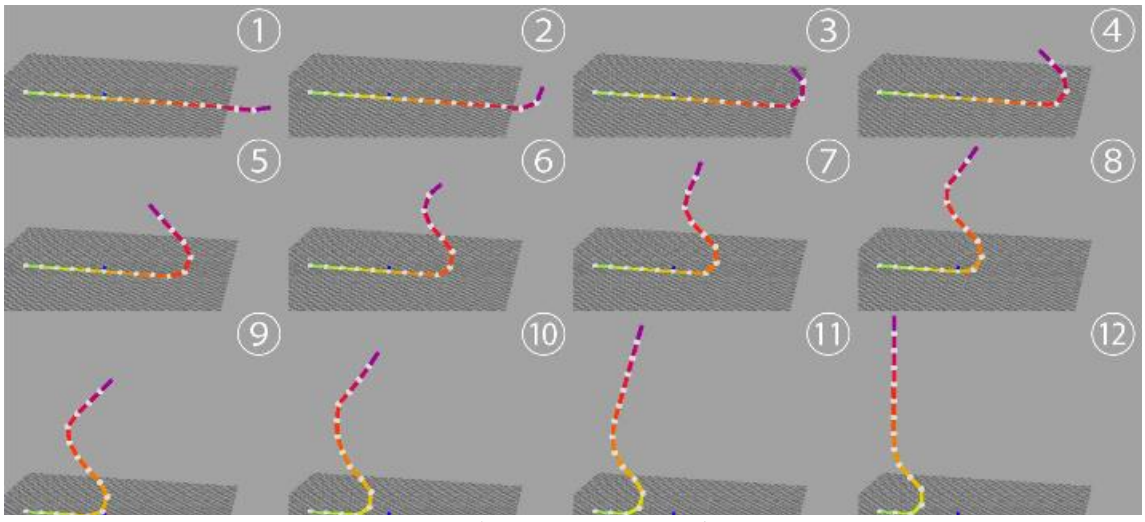

図 7 提案手法による持上げの様子