

SC法を用いた特異点近傍における歩行制御

Walking Control around Singularity Using the SC Approach

亀田幸季*, 関口暁宣*, 妻木勇一*, Dragomir N. Nenchev**

Koki KAMETA*, Akinori SEKIGUCHI*, Yuichi TSUMAKI*, Dragomir N. NENCHEV**

*弘前大学, **武蔵工業大学

*Hirosaki University, **Musashi Institute of Technology

キーワード: 特異点 (Singularity), 特異点適合法 (Singularity-Consistent Approach), 歩行制御 (Walking Control),

連絡先: 〒036-8561 弘前市文京町3番地 弘前大学大学院 理工学研究科 妻木研究室
亀田幸季, E-mail: h05gs802@stu.hirosaki-u.ac.jp

1. 序論

ヒューマノイドロボットにおける最大の特徴は、人間と同じ2本の脚で行う2足歩行である。この2足歩行を可能にする歩行制御技術は、様々な所で研究され発展してきた。しかし、現在のところ人間と同等レベルの歩行動作を再現できるまでには至っていない。

人間の歩行動作との一番の違いは膝の使い方にある。多くのヒューマノイドロボットは膝を曲げたままの姿勢で歩行制御が行われる。これは、膝を伸ばしきった状態が特異点にあたるためである。

一方、我々はこれまで特異点適合法 (Singularity Consistent Approach, SC approach) と呼ぶ手法を提案してきた¹⁾。この手法は、特異点においても安定した制御を実現できる。

本論文では、ヒューマノイドロボットの歩行制御に特異点適合法を適用する方法を提案する。実機を用いて静歩行動作での実験・検証を行い、ま

た、その有効性を検証する。

2. 歩行動作と特異点

ヒューマノイドロボットが人間のような歩行動作を実現できない要因の一つとして、膝における特異点の問題がある。これは膝を伸ばしきった状態にあたる。この特異点および近傍においては過大な関節角速度が発生したり制御不能に陥るため、多くの場合、特異点を避ける目的で膝を曲げたままの歩行制御が行われてきた。しかし、この膝を曲げたままという姿勢は、常に膝のアクチュエータがトルクを出し続けなければならないという姿勢であり、本来望ましいものではない。

これに対し、人間は歩行動作中膝を伸ばした状態を用いていることが観測上知られている²⁾。特異点は、方向によって大きな力を発生できるという利点を持つため、特異点を利用できれば効率的な歩行動作が実現できる。人間は、巧みに特異点

を利用し効率的な歩行動作を実現していると考えられる．観測した人間の歩行動作の例をFig. 1に示す．これは，矢状面内の動きであるが特異点近傍を通過していることがわかる．

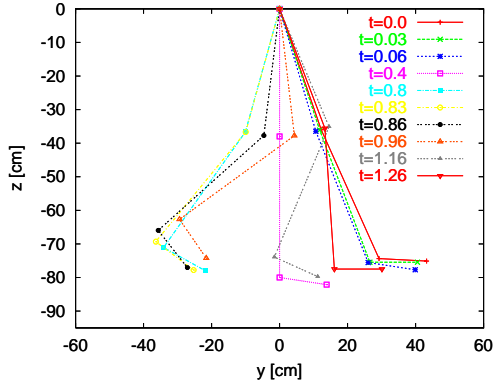


Fig. 1 Motion of walking

3. 特異点適合法

これまで我々が提案してきた特異点適合法について以下に概要を述べる．マニピュレータの手先速度 \dot{x} と関節角速度 \dot{q} の関係は，ヤコビ行列 J を用いて以下のように表される．

$$\begin{aligned}\dot{q} &= J^{-1}\dot{x} \\ &= \frac{1}{\det J}(\text{adj}J)\dot{x}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで $\det J$ は J の行列式であり， $\text{adj}J$ は J の余因子行列である．特異点において関節角速度が求められない原因は $\det J$ が 0 になるためである．しかし，手先速度方向を実現する関節角速度間の関係は $\text{adj}J$ に含まれている．そこで，式(1)を以下のように書き換えることにする¹⁾．

$$\dot{q} = \sigma b (\text{adj}J)u_r \quad (2)$$

ここで， σ は正負を表す単位量， b は大きさを表す正のスカラー値， u_r は手先速度方向を表す単位ベクトルである．

特異点およびその近傍においても， b や σ を適当に設定することで，指令手先速度方向を正確に

追従し，かつ過大な関節角速度を発生させることなく安定に制御することができる．ただし，特異点近傍においては指令手先速度の大きさは保障されない．

4. 特異点適合法による歩行制御

特異点適合法をヒューマノイドロボットの歩行制御に組み込む．組み込むにあたり，本研究で使用するヒューマノイドロボットHOAP-1の6自由度脚モデルを用いた．なお，ここで論じるのはすべてオフラインで歩行を計画する方法である．

まず，Fig. 2 に示すような特異点近傍を通過する片脚の軌道を作成した．そのときの膝の関節角度と角速度を計算した結果をFig. 3 に示す．(a) が通常の逆ヤコビ行列を用いた結果であり，(b) が特異点適合法による結果である．

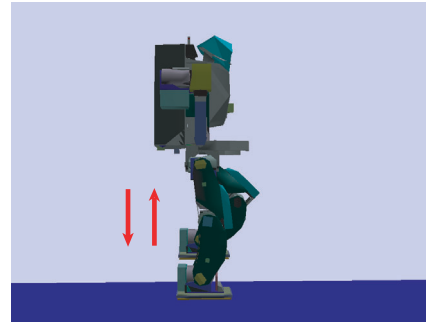


Fig. 2 Ankle trajectory

図からわかるように，特異点適合法により過大な関節角速度の発生が抑制できている．しかし，歩行制御に組み込むにあたりその特徴から以下の問題が発生する．

- 片脚ずつ特異点適合法を適用すると，両脚を同時に動かす必要がある場合，両脚の同期が取れず転倒する恐れがある．
- 関節角速度の大きさが抑えられるため目標の移動距離が満たされない．

どちらも通常の逆ヤコビ行列を用いた制御にお

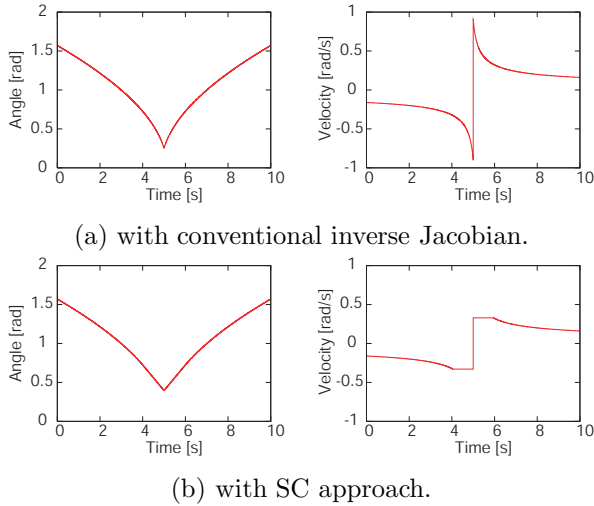


Fig. 3 Joint angle and joint velocity.

いては発生しない問題である．これらの問題に対し，我々は両脚を一つの系とみなしトータルでの移動距離を考えることで解決を図った．

まず，両脚を一つの系とみなし各脚のヤコビ行列から一つの行列を生成する．左右の足先に対する腰位置のヤコビ行列をそれぞれ J_L, J_R とする．それぞれの足先から見た腰位置を ${}^L x_w, {}^R x_w$ とすると，次のような関係が得られる．

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_R \\ \dot{q}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_R & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & J_L \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} {}^R \dot{x}_w \\ {}^L \dot{x}_w \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで， q_R, q_L はそれぞれ左右の脚の関節角速度である．この全体のヤコビ行列に対し，特異点適合法を適用することで，特異点近傍においても両脚の同期のとれた安定した動作を実現できる．

次に，トータルでの移動距離を考える．関節角速度の抑制によって目標移動距離が満たされなくなるのは特異点近傍のみである．特異点近傍に入る前の速度を大きくすることでトータルでの移動距離を満たすことが可能である．また，速度を大きくする代わりに十分な時間をかけることでも目標移動距離を満たすことができる³⁾．しかし，歩行動作においては歩調に大きな影響を与えるため今回は用いなかった．

5. 実験と検証

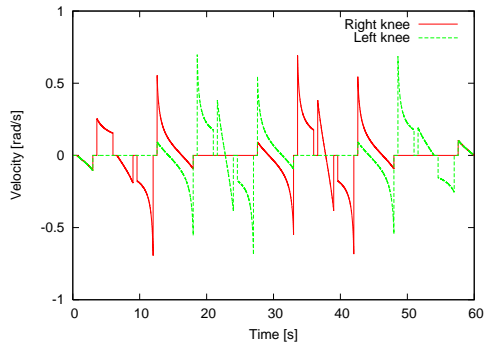
提案する手法の有効性を確認するため，実験を行った．実験に用いる歩行軌道は片脚3歩の静歩行軌道であり，腰の高さは常に一定である．比較のため，計算は従来の逆ヤコビ行列によるものと特異点適合法によるものと同じ軌道を計算することにした．歩行動作中，特異点近傍を通るようにあらかじめ腰の高さを調整した．また，関節角速度を滑らかに変化させるために関節角速度のノルムに対する台形補間を行った³⁾．

生成した歩行動作における膝の関節角速度をFig. 4に示す．(a)が逆ヤコビ行列を用いたもので(b)が特異点適合法を用いたもの，(c)が(b)の結果に台形補間を行ったものである．今回は腰の高さ一定という条件下であるため，特異点近傍に入るのは以下の場合に限られた．

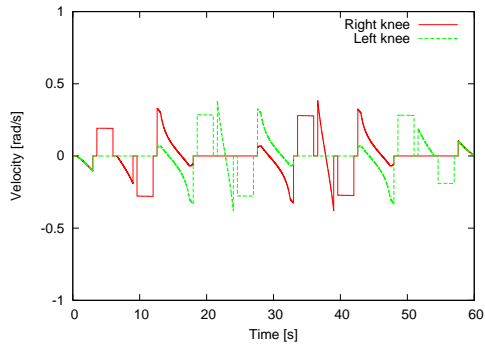
- 遊脚が次の目標位置に到達するとき(各脚について)．
- 重心移動のため腰位置が次の目標位置に到着するとき．

Fig. 4よりわかるように，特異点適合法を導入した歩行制御を行うと過大な関節角速度の発生が抑えられていることがわかる．このとき，目標移動距離も満たされていた．また，台形補間を行うことで関節角速度が滑らかに変化していることがわかる．

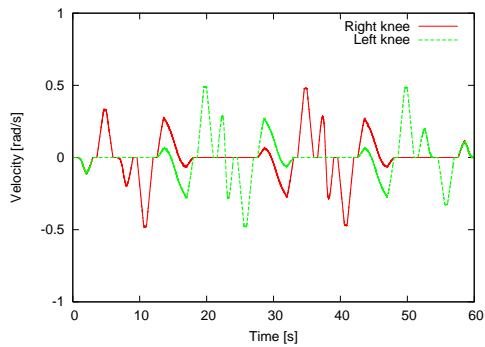
また，Fig. 4の(c)において得られた歩行データを実機HOAP-1に実装した．外乱に対する安定化制御などは何も行っていない．そのときの連続写真をFig. 5に示す．(a),(e),(h)が特異点近傍である．実機の歩行の様子からも特異点近傍を自然に通過できていることが確認できる．



(a) with conventional inverse Jacobian.



(b) with SC approach.

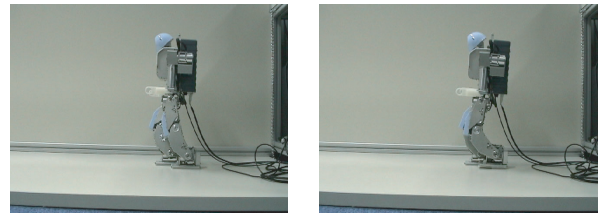


(c) with SC approach + trapezoid interpolation.

Fig. 4 Experimental results.

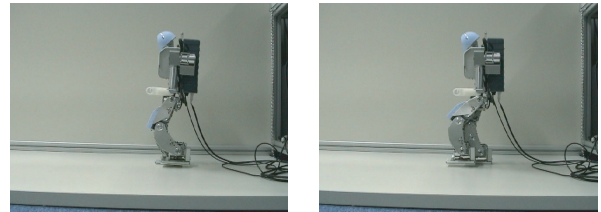
6. 結論

本論文では、ヒューマノイドロボットの特異点近傍における歩行制御を実現するために、歩行制御に特異点適合法の導入を提案した。このとき発生するいくつかの問題点を指摘し、その解決策を示した。提案する手法について、腰の高さ一定の静歩行軌道を用いた実験と検証を行いその有効性を実証した。



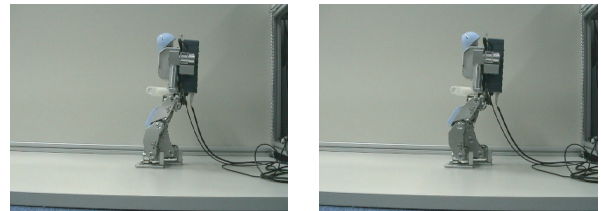
(a) 18.0 s

(b) 20.0 s



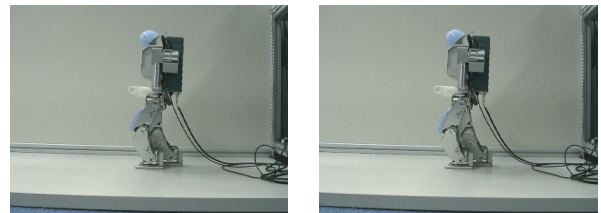
(c) 22.0 s

(d) 24.0 s



(e) 27.0 s

(f) 29.0 s



(g) 31.0 s

(h) 33.0 s

Fig. 5 Walking motion of HOAP-1.

参考文献

- 1) 妻木勇一, 小寺真司, D. N. Nenchev, 内山勝: “6自由度マニピュレータの特異点適合法遠隔操作”, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 195–204, 1998.
- 2) 関口暁宣, 跡部有希, 亀田幸季, 妻木勇一, D. N. Nenchev: “特異点適合法によるヒューマノイドロボットの動作生成に関する考察”, 第21回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2A27, 2003.
- 3) 妻木勇一, 高橋貢, D. N. Nenchev: “SC法における軌道計画”, [No. 04-4] ロボティクス・メカトロニクス講演会'04講演論文集, 2P2-L1-15, 2004.