

特異点適合法に基づいた ヒューマノイドロボットの静歩行

Static Walk of a Humanoid Robot Based on the Singularity-Consistent Method

学 高橋 健太郎 (武蔵工大) 野田 雅史 (武蔵工大)

正 Dragomir N. Nenchev (武蔵工大)

Kentaro TAKAHASHI, Masashi NODA, Dragomir N. NENCHEV,
Musashi Institute of Technology

Abstract: This paper addresses the problem of naturally looking and energy efficient walk of biped humanoids. We presuppose that such walk requires motion control capability around kinematic singularities, such that the knee can be fully extended. This problem is tackled by adopting the Singularity-Consistent method developed for manipulator motion control at and around kinematic singularities. We implemented the method with a HOAP-2 humanoid robot, demonstrating stable static walk as a first step in this direction.

Key Words: Humanoid robot, Singularity-Consistent approach, Biped walking

1 緒言

2 足歩行をするヒューマノイドロボットの動作生成に ZMP (Zero-Moment Point) [1] がよく用いられている。この ZMP は動作生成のための指標や、フィードバック制御を行うために用いられている [2], [3]。脚を制御する際に逆運動学が用いられているが、この方法には特異点が存在するという問題がある。脚機構において、膝を伸ばしきった姿勢がこの特異姿勢の一つである。このような特異点の周りでは、過剰な関節回転速度が発生してしまうことがよく知られている。この問題に対して、多くのヒューマノイドロボットは膝を伸ばしきらないよう、膝を曲げたままでの歩行を行っている。しかしこのような歩行は不自然で、しかも膝関節に余計なエネルギー消費を与えてしまう [4]。

前述のとは異なった、受動歩行 [5] という歩行法が存在する。この歩行法では機構を適切に設計するだけで、モーターによる補助無しに、自身に作用する重力のみで斜面を下る歩行法である。近年、モーターによる最小限のエネルギー消費により平面を受動歩行する研究 [6] が発表されたものの、どのようにこの歩行法をヒューマノイドロボットに適用するかという問題は未解決のままである。

我々は自然で・エネルギー効率もよい歩行法を研究するにあたってまず特異点とその周辺でも制御を可能とし、膝を伸ばした姿勢を可能とする。そのためにマニピュレータの制御用に提案された特異点適合法 [7] を適用する。我々の研究室では特異点適合法による膝を伸ばした動作を確認した [8]。そして今回我々は、静歩行の枠組みで、この膝を伸ばした姿勢を含む動作生成に取り組む。ここで、特異点適合法を適用しての動歩行への可能性は弘前大学での研究 [9] で紹介されている。

2 ヒューマノイドロボットに対するハイブリッド制御

特異点適合法をヒューマノイドロボットの脚に適用するが、制御対象である脚の端点で零空間ベクトルが消えてしまう方向 u が存在する。これは特異姿勢である膝を伸ばした姿勢で、その伸ばした姿勢の接線方向に脚を動かそうとした場合起こる (Fig. 1 の方向 u)。特異点適合法では、特異点に出入りはできるものの、特異姿勢を維持するように動作することは不可能であることを意味している。しかしこのような膝を伸ばしたままでの動作は人間のそれによく見られ [10] [11] 自然な動作を目指す我々にとっても必要な動作である。この問題に対して、我々は直接的な手法を

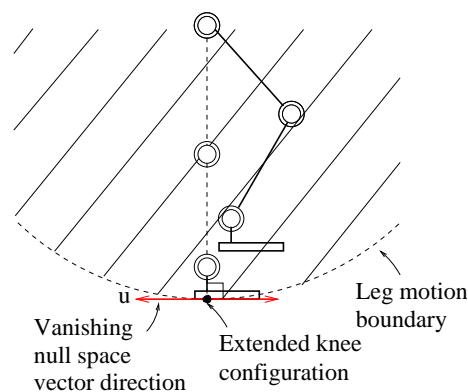


Fig.1: Condition for vanishing null space vector.

とる。膝を伸ばしたままでの動作が必要なので、その他の関節に直接的に指示を与えることにする。特異点適合法を用いた作業空間での制御と、関節空間で制御のハイブリッド制御を行う (Fig. 2)。Fig. 2 で示した方向を特異点適合法と関節空間での制御で制御するが、関節空間は 5 次補間法を用いて直接的に各関節を制御している。

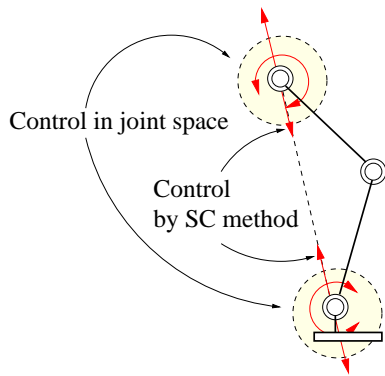


Fig.2: Hybrid control approach.

3 実験

実験機 HOAP-2 [12] に前述のハイブリッド制御を適用し、静歩行を行った。このとき我々は、モーションプリミティブ (以下 MP: Motion Primitives) を静安定マージンの調査結果によって定義し、MP の組み合わせや繰り返して静歩行を生成した。

3.1 Motion Primitives

最低限の動作を組み合わせることによって動作を生成する。この最低限の動作を MP と定義し、静的に安定した動作 (MP) を周期的に繰り返すことで歩行を生成する。この MP を以下のように定義した (Fig. 3 も参照):

1. 初期姿勢。
2. 左足上に CoM を移動する。
3. 右足を上げる。
4. MP の組み合わせ動作:
 - CoM を中心に移動;
 - 右足を下げる;
 - 左脚で上体を押し出す。
5. 右足上に CoM を移動する。
6. 右脚に揃うように左足を上げる。
7. MP の組み合わせ動作:
 - CoM を中心に移動;
 - 左足を下げる;
 - 右脚で上体を押し出す。
8. 左足上に CoM を移動する。
9. 左脚に揃うように右足を上げる。
10. 右足を下げる。
11. CoM を中心に移動 (初期姿勢に戻す)。

このとき、MP の切り替えは 1 s で行っている。そして特異点適合法は足の上げ下げに、そして他の動作は関節空間による制御で動作している。

3.2 静安定性

ハイブリッド制御で MP を生成する際に、関節のどの程度が安定した範囲なのか知る必要がある。これについて我々は、HOAP-2 の静安定マージンを実験的に調査した。MP で動作する安定した姿勢を再現し、そこから関節角速度 1 pulse/ms (4.78 deg/s) でモーターを回転させ、ロボットを転倒させる。この間、HOAP-2 に搭載されている感圧

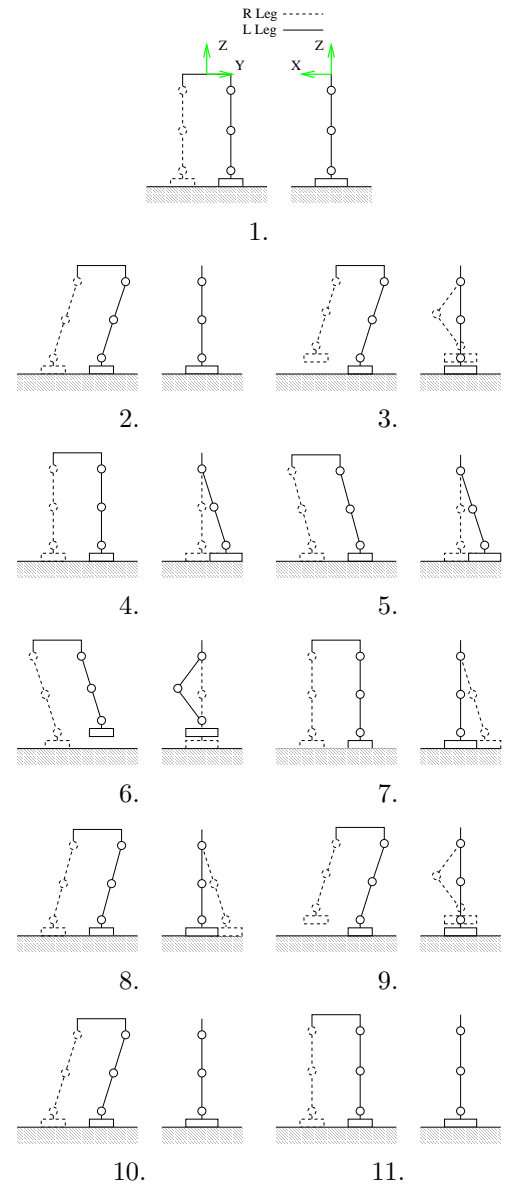


Fig.3: Motion primitives.

センサにより得られる床反力と圧力中心点 (CoP) のデータより静安定マージンを決定した (Table 1).

Table1: Static stability margins for HOAP-2

Initial position	Direction of motion	Stability interval
RLeg up	Front	≥ -6.68 [deg]
	Back	≤ 7.86 [deg]
	Left	stable in whole motion
	Right	≥ 9.97 [deg]
LLeg up	Front	≥ -6.18 [deg]
	Back	≤ 8.38 [deg]
	Left	≤ -10.54 [deg]
	Right	stable in whole motion

3.3 動作結果

以上を元に HOAP-2 で静歩行を行った。この時のエンコーダによる膝関節のデータを Fig. 4 に載せる。ここから動作中、膝関節が伸びきった状態 (膝関節が 0 deg の状態) ができていることが確認できる。そして Fig. 5 よりスムーズな歩行が生成されていることがわかる。

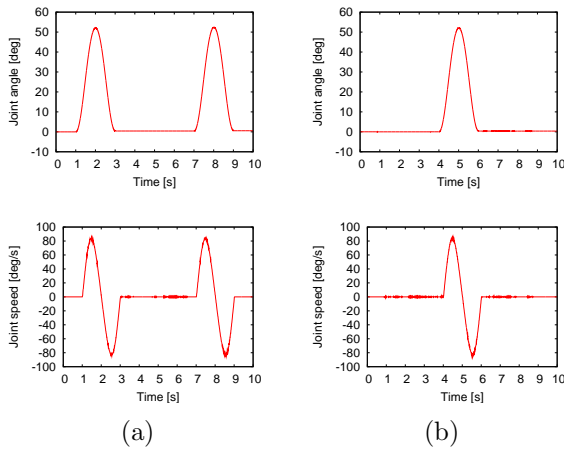


Fig.4: Knee motion data for (a) left leg, (b) right leg

4 結言

我々は膝を伸ばした姿勢を含んだ静歩行の動作生成法を提案した。このとき、逆運動学をベースとした特異点適合法と関節空間でのハイブリッド制御を用いた。今後我々は、この方法での動歩行を目指す。これにより、エネルギー効率の向上と自然な動作が実現されるでしょう。

文 献

- [1] M. Vukobratovich, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic, "Biped Locomotion, Stability, Control and Application," Springer Verlag, 1990.
- [2] 梶田秀司: "ゼロモーメントポイント (ZMP) と歩行制御," 日本ロボット学会誌, Vol. 20 No. 3, pp.229-232, 2002.
- [3] T. Sugihara, Y. Nakamura and H. Inoue, "Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control," in Proc. 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Washington, DC, May 2002, pp. 1404-1409.
- [4] Y. Ogura, T. Kataoka, K. Shimomura, H. Lim and A. Takanishi "A Novel Method of Biped Walking Pattern Generation with Predetermined Knee Joint Motion," in Proc. 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 2004, pp. 2831-2836.
- [5] T. McGeer, "Passive Dynamic Walking," The International Journal of Robotics Research, Vol. 9, No. 2 pp. 62-81, 1990.
- [6] K. Ono and R. Takahashi, "Self-Excited Walking of a Biped Mechanism," The International Journal of Robotics Research, Vol. 20, No. 12 pp. 953-966, 2001.
- [7] D. N. Nenchev, Y. Tsumaki and M. Uchiyama, "Singularity-Consistent Parameterization of Robot Motion and Control," The International Journal of Robotics Research, Vol. 19, No. 2 pp. 159-182, 2000.
- [8] 岩倉崇, 逸見孝司, D. N. Nenchev, 妻木勇一, "特異点適合法を用いた HOAP-2 の姿勢制御," [No. 05-4] ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 公演論文集, 2P1-S-051, 2005.
- [9] 亀田幸季, 関口暁宣, 妻木勇一, D. N. Nenchev, "特異点近傍における歩行動作生成," [No. 05-4] ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 公演論文集, 1P2-S-042, 2005.
- [10] S. H. Collins, M. Wisse and A. Ruina, "A Three-Dimensional Passive-Dynamic Walking Robot with Two Legs and Knees," The International Journal of Robotics Research, Vol. 20, No. 7 pp. 607-615, 2001.

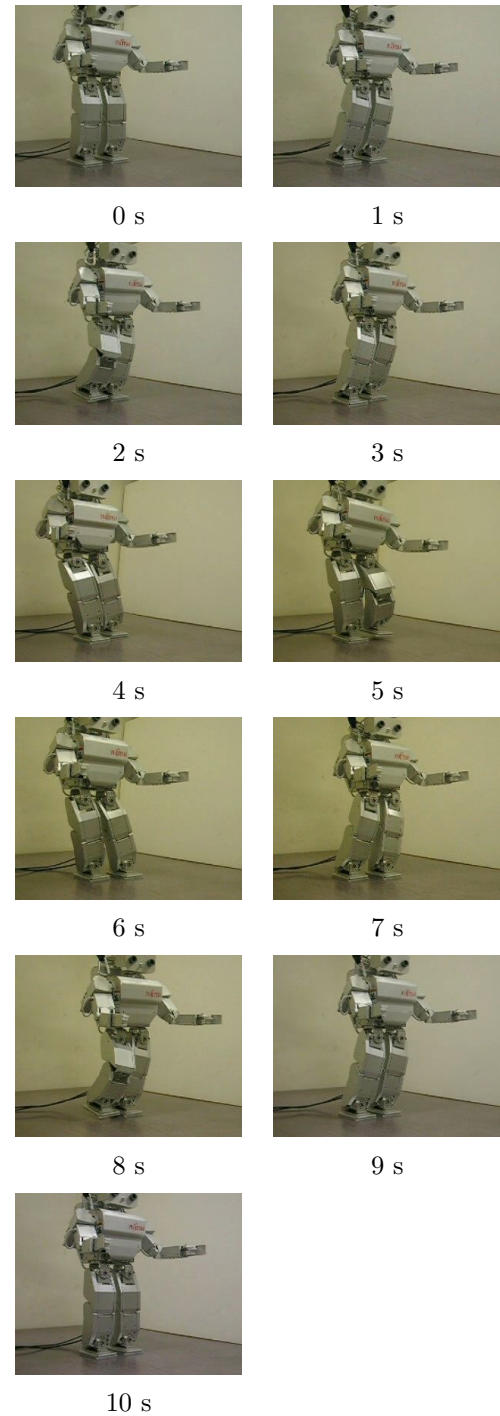


Fig.5: Motion snapshots of walk with static stability.

- [11] 山下将弘, 倉爪亮, 米田完, 長谷川勉, "2 足歩行ロボットの膝関節伸展歩容," [No. 05-4] ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 公演論文集, 1A1-S-042, 2005.
- [12] 富士通オートメーション株式会社, 小型ヒューマノイドロボット「HOAP-2」取扱説明書.