

2足歩行ロボットの膝関節伸展歩容

Straight legged Walking of a Biped Robot

○ 山下 将弘 (九州大) 倉爪 亮 (九州大) 米田 完 (東工大) 長谷川 勉 (九州大)

Masahiro YAMASHITA Ryo KURAZUME Tsutomu HASEGAWA

[†]Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, Japan

[†]{yamashita, kurazume, hasegawa}@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

Kan YONEDA

Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan

yoneda@mes.titech.ac.jp

This paper describes a methodology for generating a straight legged walking pattern by utilizing up-down motion of an upper body. This method is based on the idea of the sway compensation trajectory, and utilizes two new indexes which indicate how much the knee joints are utilized efficiently, the Knee Stretch Index (KSI) and the Knee Torque Index (KTI). The basic idea is, 1) when the knee joint angle is already 180 degrees and the ZMP error is large, the waist position is lowered, 2) when the knee joint angle is less than 180 degrees, the waist position is modified so that the KSI or the KTI is minimized. The effectiveness of the proposed method is verified through computer simulations and walking experiments using a walking robot HOAP-1.

Key Words: Humanoid, Energy, joint torque, knee-joint

1 序論

2足ヒューマノイドロボットは、機械システムに対してユーザーが受ける恐怖感や威圧感の低減や社会基盤との親和性に優れているため、福祉施設での医療サポートやエンターテインメント分野での活躍が期待されている。このようなヒューマノイドロボットが人間環境で共存していくために、ロボットはユーザーに違和感を与えないよう人間らしく自然に振舞うことが重要である。しかし、現在の2足ヒューマノイドロボットの動作は不自然であるものが多い。例えば、多くの2足ロボットは腰の位置を低く保ち、膝を曲げた状態で歩行している。これはロボットの膝関節が伸び、自由度が縮退したときにはZero Moment Point (ZMP) 制御が困難になるためである。一方、人間は上体の上下運動、腰、膝そして足首の関節をうまく使い、十分な自由度を保ちながら歩行している。膝を伸ばすことによって、体重を支えるためのトルクが少なくてすみ、エネルギー効率も高い。

そこで、本研究では3D揺動歩容、繰り返し収束計算に基づく、胴体の上下動による膝関節の伸展を利用した歩行動作計画手法を提案する。また、膝関節を利用した歩容の評価指標として、Knee Stretch Index (KSI) および Knee Torque Index (KTI) を提案する。

2 2足歩行ロボットの3D揺動歩容

3D揺動歩容 [1] とは、ロボットの歩行速度や加速度、揺動幅、支持脚対角線を入力パラメータとして、安定した歩行を実現するZMP軌道と重心軌道を導くものである。

2.1 3D揺動歩容

以下、ロボットの腕、脚の質量は胴体に比べて十分小さいと仮定し、ロボット全体を (x_g, y_g, z_g) に置かれた単質点モデルで考える。まず、床面が平面で、ロボットの重

心の床面からの高さ z_g が一定であるとする、床面上のZMPの位置 $(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ は、

$$\begin{pmatrix} x_{zmp} \\ y_{zmp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} - A \begin{pmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{pmatrix} \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $A = \frac{z_g}{g}$ である。次に、両脚の足裏の中心を結んだ対角線を

$$x \cos \theta + y \sin \theta = d \quad (2)$$

とすると、安定歩行を実現するためには、この線上にZMPが存在しなければならない。このことから、重心軌道は

$$\cos \theta (x_g - A \ddot{x}_g) + \sin \theta (y_g - A \ddot{y}_g) = d \quad (3)$$

を満たさなければならない。ここで、ロボットの進行方向を x 軸方向、それに垂直な方向を y 軸方向とすると、式(3)を満足する重心の移動加速度は

$$x_g = C_1^x e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^x t^2 + a_1^x t + a_0^x \quad (4)$$

$$y_g = C_1^y e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^y e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^y t^2 + a_1^y t + a_0^y \quad (5)$$

となる。上式は $x_g - A \ddot{x}_g$ 、 $y_g - A \ddot{y}_g$ の特殊解および一般解の和である。

2.2 多質点モデルでの繰り返し収束計算

前項で計画された式(4)と(5)の軌道は、ロボットの腕や脚の質量を胴体に比べて十分小さいとして、単質点モデルを仮定して求められたものである。しかし、実際のロボットは多質点であるので目標ZMP軌道との間に誤差が存在する。したがって、より安定な歩行の実現のためには、多質点モデルを用いてより正確な重心軌道と関節指令値に修正する必要がある。そこで、繰り返し収束計算を用いて、多質点モデルによって計算されたZMP軌道を単質点モデルによって計算されたZMP軌道に一致させるための重心軌道の補正量を導く手法を示す。

- 1) 理想の ZMP 軌道及び重心軌道 X_g^0 を単質点モデルによって近似的に式 (1), (4), (5) から求める .
- 2) 現在の重心軌道 X_g^n から基準点 (腰位置) や手足の関節軌道 Φ^n を計算する . ただし, 手先, 脚先の軌道はあらかじめ設計されたものを用い, 収束計算による変更はないものとする .
- 3) 多質点モデルでの ZMP 軌道 $X_{zmp}=(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ を以下の式により計算する .

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i (r_{ix} (\ddot{r}_{iz} + g) - r_{iz} \ddot{r}_{ix}) - I_i \dot{\omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^N m_i (\ddot{r}_{iz} + g)} \quad (6)$$

$$y_{zmp} = -\frac{\sum_{i=1}^N m_i (-r_{iy} (\ddot{r}_{iz} + g) + r_{iz} \ddot{r}_{iy}) - I_i \dot{\omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^N m_i (\ddot{r}_{iz} + g)} \quad (7)$$

- 4) 理想の ZMP 軌道 X_{zmp}^{ref} と実 ZMP 軌道 X_{zmp} の差 $e_{zmp} = X_{zmp}^{ref} - X_{zmp}$ を求め, これを離散化した ZMP 軌道誤差 e_{zmp}^t を求める . 目標の ZMP 軌道を X_{zmp}^{ref} , この軌道に一致するために修正された重心軌道を X_g^{ref} , 現在の重心軌道を X_g とすると, 目標の状態と現在の状態の誤差は次のようになる .

$$e_{zmp} = e_g - A\ddot{e}_g \quad (8)$$

ただし, $e_{zmp} = X_{zmp}^{ref} - X_{zmp}$, $e_g = X_g^{ref} - X_g$ とする . 上式をサンプリング周期 Δt で離散化した ZMP 軌道誤差は次式で求まる .

$$\begin{aligned} e_{zmp}^t &= e_g^t - A\ddot{e}_g^t \\ &= e_g^t - A \frac{e_g^{t+1} - 2e_g^t + e_g^{t-1}}{(\Delta t)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

- 5) ZMP 軌道誤差 $e_{zmp}^t \rightarrow 0$ となるような重心軌道の修正量 e_g^t を, 全離散時間の繰り返し計算により求める (第 1 の繰り返し計算) . その重心軌道の修正量 e_g^t は

$$e_g^t = \frac{e_{zmp}^t + \frac{A}{(\Delta t)^2} (e_g^{t+1} + e_g^{t-1})}{1 + 2\frac{A}{(\Delta t)^2}} \quad (10)$$

で求められる .

しかし, 実験の結果, 上式で得られた重心軌道の修正量を現在の重心軌道に直接加えると, 重心軌道は ZMP の速度不連続点で振動的になる傾向がある . そのため, 上式に滑らか拘束を加えた次式を最小にする e_g^t を求める .

$$\begin{aligned} \min_{e_g^t} & \left(e_g^t - \frac{e_{zmp}^t + \frac{A}{(\Delta t)^2} (e_g^{t+1} + e_g^{t-1})}{1 + 2\frac{A}{(\Delta t)^2}} \right)^2 + \\ & k \left(e_g^t + X_g^t - \frac{e_g^{t+1} + X_g^{t+1} + e_g^{t-1} + X_g^{t-1}}{2} \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

- 6) $X_g^{ref} \leftarrow X_g + e_g^t$ より, 修正された重心軌道 $X_g^{n+1} = X_g^{ref}$ を求める .
- 7) 重心軌道の修正量 e_g^t が十分小さければ終了 .
- 8) 2) へ戻る . (第 2 の繰り返し計算)

3 膝関節伸展歩容

ここではより人間に近い歩行動作の計画法として, 胴体の上下動による膝関節の伸展を利用した手法を示す . このために, まず膝関節の伸展を利用した歩容の評価指標として Knee Stretch Index (KSI) 及び Knee Torque Index (KTI) を提案する .

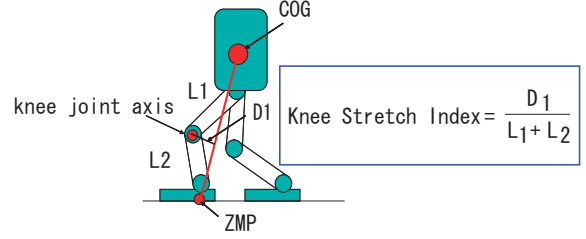


Fig.1: Definition of Knee Stretch Index

3.1 Knee Stretch Index

ロボットの全質量が重心にあり, 足裏以外から受ける外力の影響を無視すると, 地面から受ける力は重心と ZMP を結んだ直線に沿って足裏の ZMP に作用する . そのため, 体重を支えるために膝関節に必要なトルクはこの直線と膝回転軸との距離に比例する .

以上より, 図 (1) に示すように, 重心と ZMP を結んだ直線の長さ D_1 とロボットの脚の長さ L_1, L_2 との比を Knee Stretch Index (KSI) と定義する .

$$Knee\ Stretch\ Index = \frac{D_1}{L_1 + L_2} \quad (12)$$

KSI は単質点モデルを仮定したときの全体重を支えるために膝関節に必要なトルクを示している .

3.2 Knee Torque Index

KSI はロボットを単質点モデルと仮定して導出された評価指標であるが, より厳密に評価するためにはロボットを多質点モデルで考える必要がある . そこで次に Knee Torque Index (KTI) を提案する .

まず, 床平面と平行で膝関節の回転軸を含んだ平面を考える . 次に, この平面上での ZMP を従来の ZMP と同様の方法で求める . この ZMP を knee-plane ZMP (KZMP) と定義する . KZMP では ZMP と同様にロール, ピッチ軸周りのモーメントは発生しないので, 膝関節の回転軸上に KZMP が存在するならば, 体重を支えるために膝でのトルクは必要ない .

以上より, Knee Torque Index (KTI) は図 (2) に示すように, KZMP と膝回転軸との距離 D_2 とロボットの脚の長さ L_1, L_2 との比で次のように定義される .

$$Knee\ Torque\ Index = \frac{D_2}{L_1 + L_2} \quad (13)$$

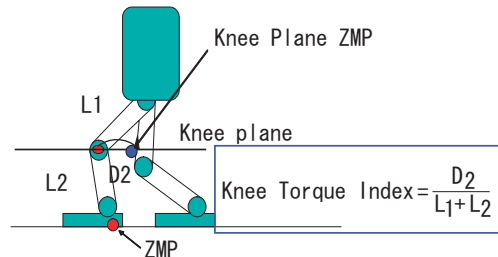


Fig.2: Definition of Knee Torque Index

3.3 KSI,KTI を用いた膝関節伸展歩容

2.2 章で示した手法ではロボットの腰の高さを一定と仮定し、膝が伸びきることは想定していなかった．そこで本章では前述の指標と胴体の上下動を用いた新しい膝伸展歩容を提案する．本手法は提案した指標の絶対値が最も小さくなる方向への重心軌道の補正量を求め、膝関節を伸ばすことでよりエネルギー効率の高い歩行を実現するものである．

具体的には繰り返し収束計算の手順 4) の前に次の手順を行う．

xz 平面上 (x 方向:進行方向, z 方向:上下方向) にロボットの重心を中心とした半径 r の円を決め、その円周上に重心軌道を微小移動させる．移動後の重心軌道を $X_g^{ref} = (x_g^{ref}, y_g^{ref}, z_g^{ref})$ 、移動前の重心軌道を $X_g^{org} = (x_g^{org}, y_g^{org}, z_g^{org})$ とする．移動後の重心軌道からロボットの関節角度、実際の重心軌道 X_g 、評価指標 (KSI,KTI) を再計算する．もし、ここで再計算した指標がもとの指標よりも小さな値となっていた場合、重心軌道の補正量を $\Delta X = X_g - X_g^{org} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ とする．この作業を半径 r の円周上の多くの点で行い、この中で最も指標の小さくなる方向への軌道の修正量 ΔX を求める．

ΔX が求まったら、実際に歩行可能な重心軌道を求めるために

1. 膝が伸びきっていない場合、指標が最も小さくなる方向 ΔX に重心軌道を修正
2. 膝が伸びきった場合または ZMP 誤差が大きい場合には、腰を落とす

という方針に基づき、繰り返し収束計算の手順 4) を次のように修正する．

- 4) 理想の ZMP 軌道 X_{zmp}^{ref} と実 ZMP 軌道 X_{zmp} の差 $e_{zmp} = X_{zmp}^{ref} - X_{zmp}$ を求め、これを離散化した ZMP 軌道誤差 e_{zmp}^t を求める．x,y 方向は $e_x^t \rightarrow e_x^t + \Delta x$ 、 $e_y^t \rightarrow e_y^t + \Delta y$ と修正する．これに加えて、膝関節角度が 180° 以内である (膝関節が伸びきっていない) とき、腰の位置を $e_z^t \rightarrow e_z^t + \Delta z$ とする．また、膝関節角度が 180° であって (膝関節が伸びきっている)ZMP 誤差が大きいとき、腰の位置を $e_z^t \rightarrow e_z^t - \Delta H$ と修正する．これらに式 (11) と同様に滑らか拘束を加え、以下のようにして e_g^t を求める．

$$\min_{e_x^t} (e_x^t + \Delta x - \frac{e_{zmp}^t + \frac{A}{(\Delta t)^2}(e_x^{t+1} + e_x^{t-1})}{1 + 2\frac{A}{(\Delta t)^2}})^2 + k(e_x^t + X_x^t - \frac{e_x^{t+1} + X_x^{t+1} + e_x^{t-1} + X_x^{t-1}}{2})^2 \quad (14)$$

$$\min_{e_y^t} (e_y^t + \Delta y - \frac{e_{zmp}^t + \frac{A}{(\Delta t)^2}(e_y^{t+1} + e_y^{t-1})}{1 + 2\frac{A}{(\Delta t)^2}})^2 + k(e_y^t + X_y^t - \frac{e_y^{t+1} + X_y^{t+1} + e_y^{t-1} + X_y^{t-1}}{2})^2 \quad (15)$$

$$\begin{cases} \min_{e_z^t} (e_z^t + \Delta z)^2 + k(e_z^t + X_z^t - \frac{e_z^{t+1} + X_z^{t+1} + e_z^{t-1} + X_z^{t-1}}{2})^2 & (1) \\ \min_{e_z^t} (e_z^t - \Delta H)^2 + k(e_z^t + X_z^t - \frac{e_z^{t+1} + X_z^{t+1} + e_z^{t-1} + X_z^{t-1}}{2})^2 & (2) \end{cases} \quad (16)$$

これにより、目標 ZMP 軌道を実現し、かつ膝関節を伸展させたロボットの重心軌道を計画することができる．

4 実験

4.1 計算機シミュレーション

前章で示した手法により KSI を最小にする膝関節伸展歩容を計画し、計算機シミュレーションを行った．

図 (3), (4) にシミュレーションの様子を示す．ただし、Duty 比 0.65, 歩行周期 4.0[sec.], 最大角加速度を 500[rad/sec.] である．図 (3) は、膝を曲げ、腰の高さが一定のままの従来の歩行である．図 (4) は第 3 節で提案した膝伸展歩容の繰り返し収束計算後の歩行である．

図 (3) が常に膝が曲がっているのに比べ、図 (4) は胴体の上下動による膝関節の伸展を繰り返し、巧みに膝関節を伸展、屈曲させながら歩いていることがわかる．

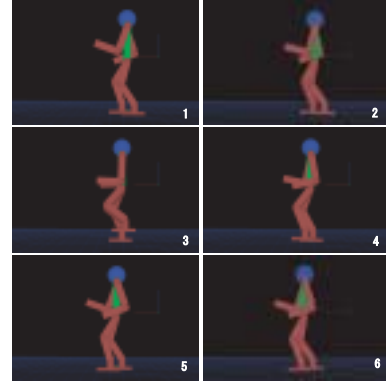


Fig.3: Conventional walking pattern

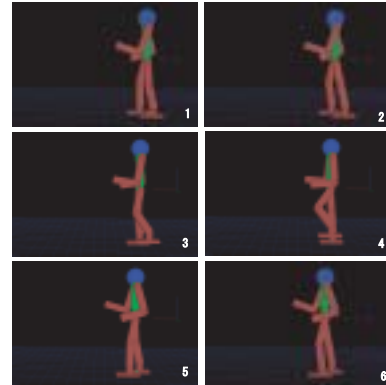


Fig.4: Proposed walking pattern using up-down motion of the upper body

また、従来の手法と提案した手法の Knee Stretch Index を比較したものを図 (5) に示す．KSI は 0 に近いほど膝を有効に活用し、エネルギー効率の良い歩行であると考えられる．図 (5) から従来の手法の KSI の値よりも提案した歩容の値の方が 0 に近いことがわかる．さらに、図 (6), (7) に膝関節でのトルク、全体の消費パワーを計算した結果を示す．これより、膝伸展歩容を用いたほうがトルク、消費パワーともに少なく抑えられており、提案した手法の有効性を確認することができた．

5 実機を用いた歩行実験 (HOAP-1)

2 足歩行ヒューノイドロボット HOAP-1 を用いて、本手法の有効性を示す実験を行った．

ここでの関節角度指令値はオフラインで計算されたものを与え、歩行パラメータは Duty 比 0.65, 歩行周期 4.0[sec.],

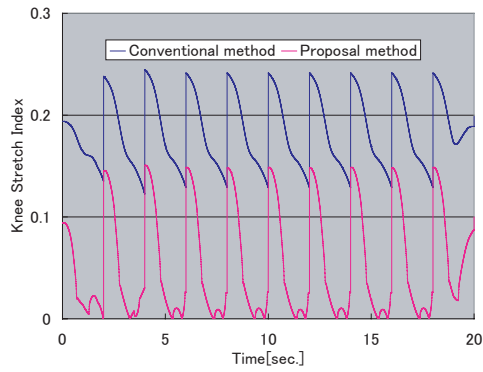


Fig.5: Comparison of Knee Stretch Index

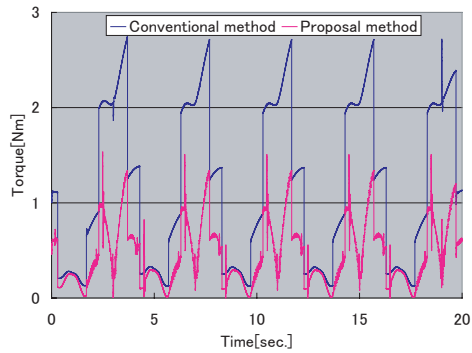


Fig.6: Torque at the knee joint

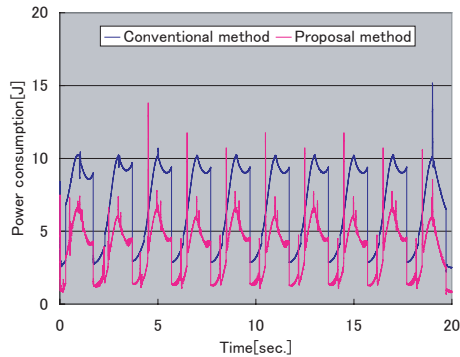


Fig.7: Power consumption

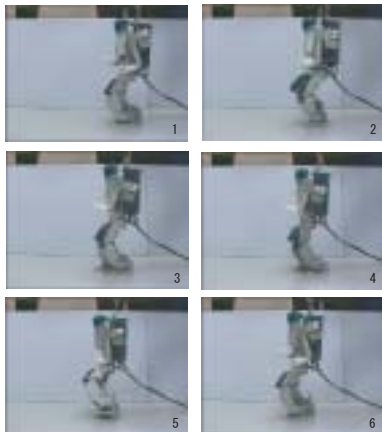


Fig.8: Walking experiment(conventional method)

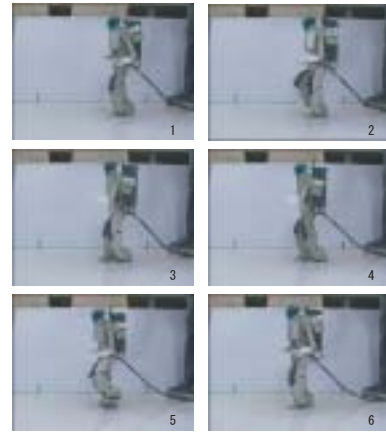


Fig.9: Walking experiment(proposal method)

最大角加速度を $500[\text{rad}/\text{sec.}]$ とした．従来の 3D 揺動歩容及び繰り返し収束計算による直進歩行の様子を図 (8) に，提案した KSI を最小にする直進歩行の様子を図 (9) に示す．これらを比較すると，実機においても膝関節伸展の動作が確認でき，またロボットが膝関節を伸ばしたときも転倒することなく安定に歩行を実現できることがわかる．

6 まとめ

本論文では Knee Stretch Index(KSI) および Knee Torque Index(KTI) を提案し，3D 揺動歩容，繰り返し収束計算に基づく，KSI, KTI を用いた胴体の上下動による膝関節伸展歩容を提案した．本手法では，膝関節が伸びきっていないときは KSI, KTI を使い，膝関節のトルクが小さくなるように軌道を計画し，膝が伸びきって ZMP の制御が困難なときは，腰を下げ必要な自由度を確保するというものである．シミュレーション実験，HOAP-1 を用いた実機実験において本手法による膝関節伸展歩容が実現可能であること，及び消費エネルギーが低減できることを確認した．

- 1) 倉爪, 米田, 田中, 玉木, 太田, 長谷川: “ 2 足歩行機械の 3D 揺動歩容 ”, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No7, pp.811-818, (2003) .
- 2) R. Kurazume, T. Hasegawa, K. Yoneda, The Sway Compensation Trajectory for a Biped Robot, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.925-931, 2003.