

運動学的情報と反力情報・ZMPを統合した人型ロボットの 重心運動推定

○舛屋賢 (阪大) 杉原知道 (阪大)

1. はじめに

大自由度系である人型ロボットの制御において、重心とZMP[1]の関係、いわゆる重心-ZMPモデル[2, 3]に基づく方法の有効性が示されている。この制御方法においては、現在のZMP位置と重心位置をリアルタイムに知る必要がある。前者は力センサで計測される床反力・床反モーメントにより計算できるが、一方で後者は、実際のロボットが質量分布系であるため、原理的には直接計測できず、真値を求められない。そこで、これを十分な精度で推定する技術が必要となる。

重心推定のひとつの方法として、ロボットにおける各リンクの質量特性から運動学的に計算する方法があるが、実際のロボットにおいては電装系の配線などにより質量特性には誤差が生じる。その誤差を減らすために、実際のロボットにおける質量特性を同定する方法[4]が提案されている。しかし、それは大規模な計算であり、毎制御周期に行うことは困難である。

これに対して、質量特性によらない方法もまた提案されている[5, 6, 7, 8]。ひとつの方法は、床反力から得られる重心加速度の2階積分であるが、初期値のオフセットを補償できず、また積分に伴い誤差の累積が生じる[5]。別の方法としては、重心-ZMPモデルに基づくものが提案されている。Stephens[6]は重心-ZMPモデルを状態方程式としてカルマンフィルタを設計し、重心のオフセットと未知の外力が推定に与える影響について調べた。また、周波数領域における重心とZMPの関係に基づいて、ZMPをローパスフィルタに通すことで重心を推定する方法[7]も提案されている。しかしこれらにおいて、その推定は水平方向運動に限られたものであるとともに、モデル化されていない重心周りのモーメントの影響を受ける。精度向上のために、ZMPと重心加速度の2階積分を相補フィルタにより組み合わせる3次元重心推定も提案されている[8]。しかし、鉛直方向の推定にはモデルに基づくものを採用しているため、質量特性による誤差が残留する。

本稿では、鉛直方向成分も推定可能な重心推定方法を提案する。ロボットの質量特性モデル、重心加速度の2階積分、重心-ZMPモデルのそれぞれから得られる重心は、前述のように原因の異なる誤差をもつ。そこで、誤差特性を明示的に表現できるカルマンフィルタによりそれらを統合することで、精度向上を図る。さらに重心-ZMPモデルに現れる重心の水平方向運動と鉛直方向運動の干渉を、鉛直方向の推定に利用する。

2. 重心-ZMPモデルにおける重心の 水平方向成分と鉛直方向成分の干渉

図1のような前額面上での人型ロボットの運動を考えよう。ロボットの重心運動と反力の関係は次の式で

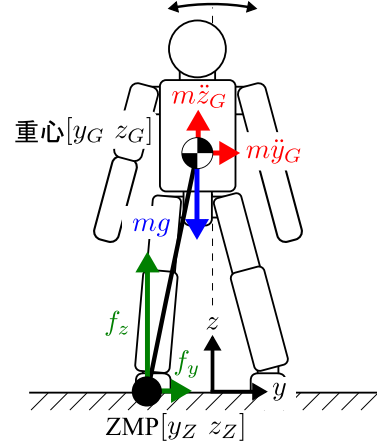


図1 前額面上における重心-ZMPモデル

表される。

$$f_y = m\ddot{y}_G \quad (1)$$

$$f_z = m(\ddot{z}_G + g) \quad (2)$$

ただし、左右方向と鉛直方向をそれぞれ y 軸方向と z 軸方向にとり、 y_G, z_G はそれぞれ慣性系に対する y 方向と z 方向の重心位置とする。また、 f_* はロボットにかかる全反力の $*$ 方向の成分であり、 m はロボットの全質量、 g は重力加速度を表す。ZMPにおいて水平軸周りのモーメントはゼロになることから、重心周りのモーメントを無視すると、ZMP周りのモーメントの釣り合いは次式で表される。

$$f_y(z_G - z_Z) = f_z(y_G - y_Z) \quad (3)$$

ただし、 y_Z と z_Z はそれぞれ慣性系に対する y 方向と z 方向のZMP位置であり、多くの場合において z_Z は任意に決定してよい。両足裏に計 n 個の6軸力センサをもつとすると、 y_Z は次式により計算可能である。

$$y_Z = \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_{xi} - (z_{si} - z_Z) f_{yi} + y_{si} f_{zi})}{\sum_{i=1}^n f_{zi}} \quad (4)$$

ただし、 y_{si}, z_{si} はそれぞれ i 番目センサの y 方向と z 方向の位置である。また、 f_{*i}, τ_{xi} はそれぞれ i 番目センサで計測された力の $*$ 方向成分、前後方向の軸周りのモーメントである。ロボットは環境と足裏のみで接触すると仮定すると、次式が成り立つ。

$$f_y = \sum_{i=1}^n f_{yi} \quad (5)$$

$$f_z = \sum_{i=1}^n f_{zi} \quad (6)$$

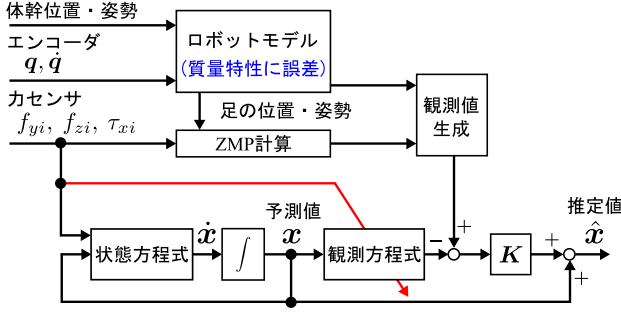


図2 提案するカルマンフィルタ

式 (1), (2), (3) から重心-ZMP モデルは次式で表される。

$$\ddot{y} = \frac{\ddot{z}_G + g}{z_G - y_Z} (y_G - y_Z) \quad (7)$$

式 (3), (7) から明らかなように、水平方向と鉛直方向の重心運動は互いに干渉する。

3. 重心-ZMP モデルにおける重心成分の干渉を利用したカルマンフィルタ

式 (3) で表した重心-ZMP モデルにおける重心の水平方向と鉛直方向の干渉を利用することで鉛直方向の精度向上を図る。\$y_G\$ だけでなく \$z_G\$ も含めて、状態量 \$\mathbf{x}\$ を次のように定義する。

$$\mathbf{x} \equiv [y_G \ \dot{y}_G \ z_G \ \dot{z}_G]^T \quad (8)$$

状態方程式として、式 (1), (2) から得られる次式を用いる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{f_y}{m} \\ 0 \\ \frac{f_z}{m} - g \end{bmatrix} + \mathbf{w}_s \quad (9)$$

ただし、\$\mathbf{w}_s \in \mathbb{R}^4\$ はシステムノイズである。次に観測モデルを考えると、ロボットモデルから運動学的な重心位置の推定値 \$\tilde{y}_G\$, \$\tilde{z}_G\$ が計算できるため、それを観測値として利用することが考えられる。慣性系におけるロボットの体幹位置・姿勢の推定には Masuya ら [9], 杉原ら [10] の方法を用いる。また、加速度積分による速度のみでは誤差が累積すると考えられるため、ロボットモデルからの重心速度 \$\dot{\tilde{y}}_G\$, \$\dot{\tilde{z}}_G\$ も観測値として利用する。さらに、式 (3) で表した重心-ZMP モデルにおける各方向の干渉を利用するために、それもまた観測モデルに組み込む。観測方程式は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_G \\ \dot{\tilde{y}}_G \\ \tilde{z}_G \\ \dot{\tilde{z}}_G \\ f_z y_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ f_z & 0 & -f_y & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \mathbf{w}_o \quad (10)$$

表1 調整したパラメータ

パラメータ	変数	値
Σ_o の対角成分	$\sigma_{o,11}$	0.001
	$\sigma_{o,22}$	1.0
	$\sigma_{o,33}$	2.0
	$\sigma_{o,44}$	0.001
	$\sigma_{o,55}$	700.0
Σ_s の対角成分	$\sigma_{s,ii} (i = 1, \dots, 4)$	0.00001

ただし、式 (10) で用いた重心-ZMP モデルについて、\$f_z\$ が分母に来ることを避けるために、\$y_Z\$ ではなく \$f_z y_Z\$ を観測値とした。また、\$\mathbf{w}_o \in \mathbb{R}^5\$ は観測ノイズである。提案方法の概要を示したものが図2である。

4. シミュレーション

4.1 カルマンフィルタの実装

実装において、提案するカルマンフィルタをサンプリング間隔 \$\Delta T\$ で離散化した。\$\Delta T\$ を用いると、式 (9), (10) は差分近似により次式のように離散化される。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{u}_k \Delta T + \mathbf{w}_{s,k} \Delta T \quad (11)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_{o,k} \Delta T \quad (12)$$

$$\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{f_{y,k}}{m} \\ 0 \\ \frac{f_{z,k}}{m} - g \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \begin{bmatrix} \tilde{y}_{G,k} \\ \dot{\tilde{y}}_{G,k} \\ \tilde{z}_{G,k} \\ \dot{\tilde{z}}_{G,k} \\ \tilde{y}_{fZ,k} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ f_{z,k} & 0 & -f_{y,k} & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

ただし、添字 \$k\$ は時刻 \$k\Delta T\$ を表すインデックスであり、表記の簡略化のために \$\tilde{y}_{fZ,k} \equiv f_{z,k} y_{Z,k}\$ とした。

式 (11) と式 (12) より、カルマンフィルタは以下の計算を行うことで推定値を得る。

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}_k^T (\mathbf{C}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}_k^T + \Sigma_o)^{-1} \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\tilde{\mathbf{y}}_k - \mathbf{C}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{1} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \mathbf{u}_k \Delta T \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{A} \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{A}^T + \Sigma_s \quad (19)$$

ただし、\$\mathbf{P}_{k|k-1}\$ と \$\mathbf{P}_{k|k}\$ はそれぞれ時刻 \$k\$ の予測値 \$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}\$ と推定値 \$\hat{\mathbf{x}}_{k|k}\$ の誤差共分散行列である。また、\$\Sigma_s\$ と \$\Sigma_o\$ はそれぞれ \$\mathbf{w}_{s,k} \Delta T\$ と \$\mathbf{w}_{o,k} \Delta T\$ の共分散行列を表し、\$\mathbf{1} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}\$ は単位行列を表す。

4.2 左右揺動運動に対するシミュレーション

人型ロボット mighty[11] を対象とし、動力学シミュレータ OpenHRP3[12] を用いてシミュレーションを行った。OpenHRP3 上では制御周期 2[ms] の PD 制御器を

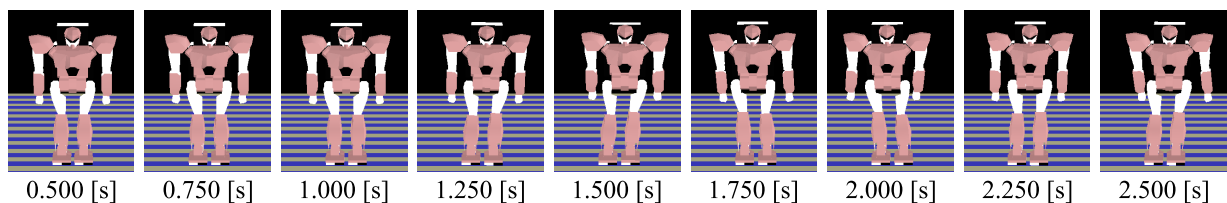


図3 左右揺動運動のスナップショット

用い、その参照関節変位は境界条件緩和法 [13] により事前に設計した。ただし、その設計において正規分布に従う誤差を質量特性に加算したモデルを用い、同じモデルを重心推定の際にロボットの質量特性モデルとして用いた。行かせた周期的な左右揺動運動の一部を図3に示す。

推定結果の一例を図4に示し、その推定誤差を図5に示す。それぞれの図において、赤線は真値、橙線は提案方法による結果を示し、緑線は比較のためのロボットモデルによるものである。また、提案方法における重心-ZMPモデルによる干渉の影響を評価するために、提案方法から式(10)の第5行目を除いて構成したカルマンフィルタの結果を青線で示す。ただし、両方のカルマンフィルタにおけるパラメータは表1のものを用い、それらは試行錯誤により調整した。また、全質量 m は事前の計測により真値が得られているとした。

まず y 方向について確認すると、ロボットモデルによる結果に比べて、カルマンフィルタを用いた結果は両方ともに精度が改善している。これは重心-ZMPモデルの有無によらないことから、加速度積分と組み合わせたことによるものだと考えられる。この位置精度の改善により速度についても精度の改善が確認できる。それぞれのカルマンフィルタを比較すると、重心-ZMPモデルがある方が、若干であるが良い結果を示しており、重心-ZMPモデルの精度向上への寄与が確認できる。

一方で、 z 方向について確認すると、速度ではあまり大きな改善は確認できない。これは、現在の z 方向速度に関するパラメータ調整において、観測値の共分散を小さくしているためである。また、重心-ZMPモデルにおける干渉が位置についてのみであることも関係していると考えられる。位置について見てみると、ロボットモデルと重心-ZMPモデルを除いたものによる結果では、質量特性の誤差により大きなオフセット誤差が生じている。これらに対して、提案方法ではその誤差を低減できているため、重心-ZMPモデルにおける干渉が推定において有効であることが確認できる。

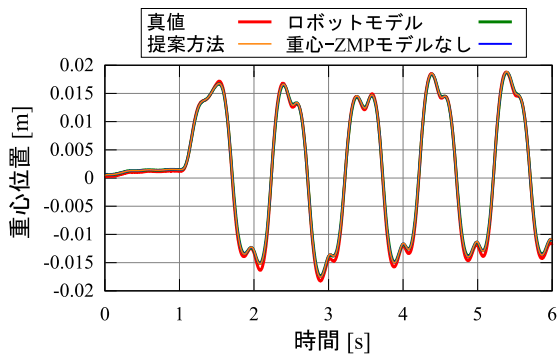
5. おわりに

本研究では、人型ロボットの重心運動を推定するために、ロボットの質量特性モデルに基づく運動学的情報と重心加速度の2階積分、重心-ZMPモデルを組み合わせるカルマンフィルタを提案した。提案方法において、重心-ZMPモデルにおける重心の各方向成分の干渉を利用することで、重心推定の精度向上を図った。人型ロボットを用いたシミュレーションを行い、左右揺動運動に対して提案方法の有効性を確認した。

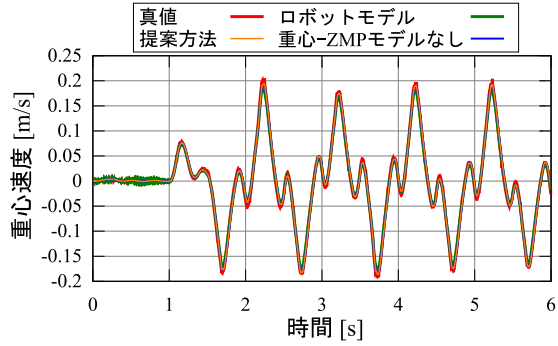
謝辞 本研究は科学研究費補助金挑戦的萌芽研究課題番号#26540135 (研究代表者:杉原知道) の支援を受けた。

参考文献

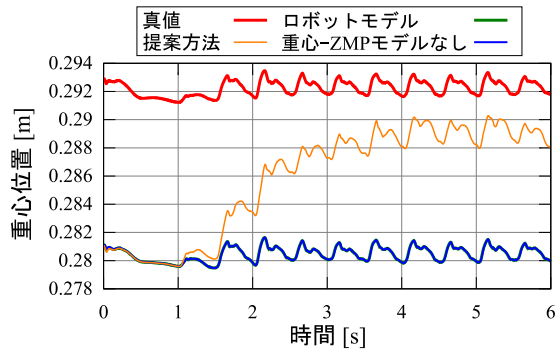
- [1] M. Vukobratović and J. Stepanenko: "On The Stability of Anthropomorphic Systems," *Mathematical Biosciences*, vol.15, no.1, pp.1-37, 1972.
- [2] 水戸部和久, 矢島克知, 那須康雄: "ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御", *日本ロボット学会誌*, vol.18, no.3, pp.359-365, 2000.
- [3] 杉原知道, 中村仁彦: "ZMP-重心モデルと台車型倒立振子モデルのアナロジーによるヒューマノイドロボットの高機動化制御", *日本ロボット学会誌*, vol.24, no.1, pp.74-83, 2006.
- [4] 鮎澤光, ベンチャージェンチャン, 中村仁彦: "ベースリンクの運動方程式を利用した脚型ロボットの最小力学パラメータの同定", *日本ロボット学会誌*, vol.27, no.9, pp.1066-1077, 2009.
- [5] J. J. Eng and D. A. Winter: "Estimations of the horizontal displacement of the total body centre of mass: considerations during standing activities," *Gait & Posture*, vol.1, no.3, pp.141-144, 1993.
- [6] B. J. Stephens: "State estimation for force-controlled humanoid balance using simple models in the presence of modeling error," *Proc. of the 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Shanghai, China, May 2011, pp.3994-3999.
- [7] B. J. Benda, P. O. Riley and D. E. Krebs: "Biomechanical relationship between center of gravity and center of pressure during standing," *IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering*, vol.2, no.1, pp.3-10, 1994.
- [8] H. M. Schepers, E. H. F. van Asseldonk, J. H. Buurke and P. H. Veltink: "Ambulatory Estimation of Center of Mass Displacement During Walking," *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, vol.56, no.4, pp.1189-1195, 2009.
- [9] K. Masuya and T. Sugihara: "A Dual-Stage Complementary Filter for Dead Reckoning of a Biped Robot Via Estimated Contact Point," *Proc. of the 2013 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, Atlanta, Georgia, USA, Oct. 2013, pp.112-117.
- [10] 杉原知道, 舩屋賢, 山本元司: "三次元高精度姿勢推定のための慣性センサの線形・非線形特性分離に基づいた相補フィルタ", *日本ロボット学会誌*, vol.31, vol.3, pp.251-262, 2013.
- [11] T. Sugihara, K. Yamamoto and Y. Nakamura: "Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots," *Robotics and Autonomous System*, vol.56, no.1, pp.82-94, 2007.
- [12] S. Nakaoka, S. Hattori, F. Kanehiro, S. Kajita and H. Hirukawa: "Constraint-based Dynamics Simulator



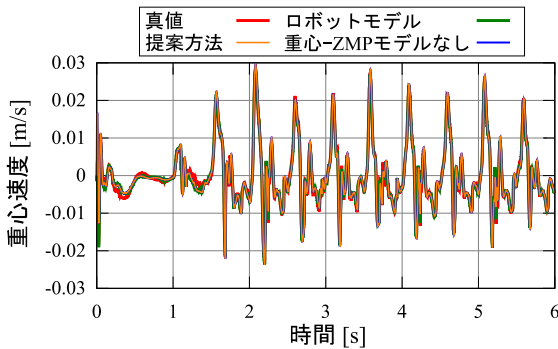
(a) y_G



(b) \dot{y}_G

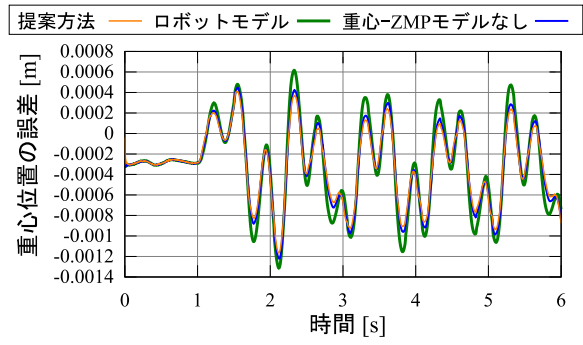


(c) z_G

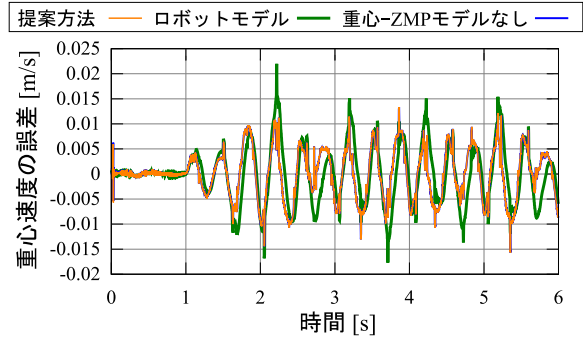


(d) \dot{z}_G

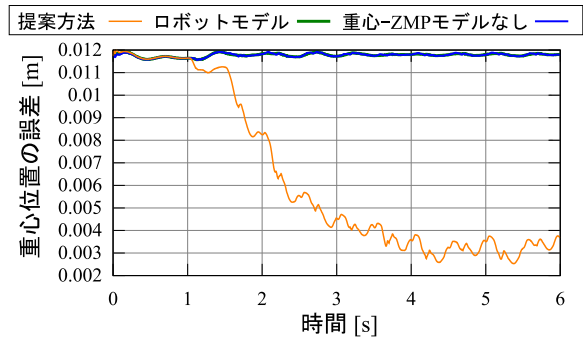
図4 左右揺動運動に対する推定結果の一例



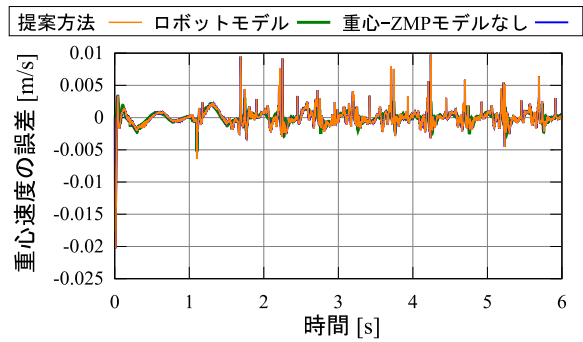
(a) y_G



(b) \dot{y}_G



(c) z_G



(d) \dot{z}_G

図5 左右揺動運動に対する推定誤差の一例

for Humanoid Robots with Shock Absorbing Mechanisms,” Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, Oct. 2007, pp.3641–3647.

- [13] 寺田耕志, 杉原知道, 國吉康夫: “境界条件緩和と運動方程式の力学的三次元対称化による二脚ロボットのオンラ

イン運動計画法”, 第25回日本ロボット学会学術講演会, 1G26, 2007.