

反力情報に基づく推定接触点と加速度センサを用いた 二脚ロボットのデッドレコニング

舛屋 賢^{*1}, 杉原 知道^{*2}

Dead Reckoning for Biped Robots using Estimated Contact Points based on Reaction Force and an Accelerometer

Ken Masuya^{*1} and Tomomichi Sugihara^{*2}

^{*1} Department of Adaptive Machine Systems, Graduate school of engineering, Osaka University
2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

^{*2} Department of Adaptive Machine Systems, Graduate school of engineering, Osaka University
2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

A novel technique of the dead reckoning for biped robots is proposed. The position of robot trunk is estimated by a complementary fusion of a relative displacement of the support foot and the acceleration. Not unlike the previous methods which suppose that the support foot is fixed with respect to the inertial frame, the support foot position is represented by the instantaneous minimum velocity point estimated by the velocities of both feet and the distribution of reaction forces, so that it works even when the support foot rolls, slips and jumps.

Key Words : Biped robot, State estimation, Dead reckoning, Complementary filter

1. はじめに

二脚ロボットや車輪ロボットのような移動ロボットの制御において、現在位置を高精度に推定する技術は重要である。慣性系における位置を得るためには、カメラ⁽¹⁾やレーザ距離センサ⁽²⁾などの外界センサからの情報がいずれかの段階で必要になるが、これらは計測周期がロボットの制御周期に比べ比較的遅い。高速なフィードバックループを構成するために、外界センサよりも比較的高速に計測できる内界センサによる推定、すなわちデッドレコニングを併用することが有用である。

車輪ロボットの分野においては、車輪の回転数から現在位置を推定する方法⁽³⁾がよく使われる。また、この推定技術とカメラ⁽⁴⁾⁽⁵⁾、DGPS⁽⁶⁾を組合わせた方法も提案されている。一方、脚ロボットの分野においては、支持脚の足先が慣性系に対して静止していると仮定して運動学によって体幹位置を逆算する方法が提案されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかし、支持脚は必ずしも常に地面に対して静止しておらず、時に転がり、すべり、跳躍する。このような場合、既存の方法では推定精度は劣

化する。加速度センサの2階積分を用いる方法もあるが、これは積分に伴う累積誤差の影響を受ける。

本研究では、二脚ロボットのための高精度なデッドレコニングを目的とする。上記の問題に対し、筆者ら⁽⁹⁾は、足先リンク上で慣性系に対して最も変位が小さいと考えられる瞬間速度最小点を路面との推定接触点とし、加速度センサ出力と相補的に組み合わせるデッドレコニングを提案した。本稿では、これを拡張し、連続性を仮定することで角速度による特異点問題を回避する瞬間速度最小点の計算方法を示す。また、反力情報に基づいてフィルタの周波数重みを適応的に決定することにより、歩行動作のみならず跳躍動作でも良好な精度が得られることを示す。

2. 特異点回避のための連続性を考慮した 瞬間速度最小点計算

本研究では、体幹位置の低周波数領域における推定値として瞬間速度最小点より求まる体幹位置 \hat{p}_B を、高周波数領域における推定値として加速度情報の2階積分をそれぞれ用い、相補フィルタを設計する。

脚ロボットのデッドレコニング⁽⁷⁾⁽⁸⁾において、足先は慣性系に対して静止していると仮定されていた。しかしより一般的には、足先の転がりやすべりにより、この仮定との乖離が生じる。そこで、足先リンク上で

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1) ken.masuya@ams.eng.osaka-u.ac.jp

^{*2} 大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1) zhida@ieee.org

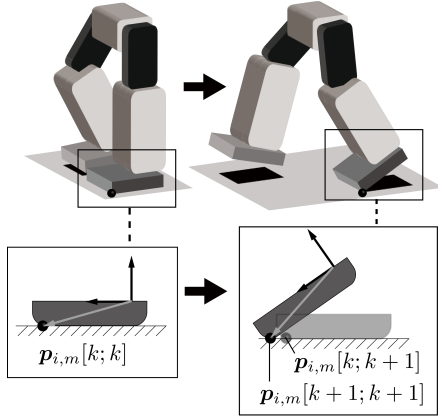


Fig. 1 The estimated contact point which has minimum velocity related to inertial frame

慣性系に対する変位が最も小さいと考えられる点を基準に運動計算することを考えよう (図1). 以下, 時間間隔 ΔT で運動を離散化し, $*[k]$ を時刻 $k\Delta T$ における $*$ の値とする. また, 慣性系に対する変位が最も小さい点は各時刻で瞬間的かつ独立に求まるため, 時刻 $k\Delta T$ で求めた値から予想される時刻 $(k+1)\Delta T$ における値を $*[k; k+1]$ と定義すると, $*[k; k+1]$ と $*[k+1; k+1]$ は本来ならば異なる. しかし, 本研究では慣性系に対する変位が小さい点であることから1ステップのような短期間ではあまり動かない, すなわち $*[k; k+1] \simeq *[k; k]$ と仮定する.

一般に, リンク i 上のある点 $\mathbf{p}_{i,m}[k]$ の慣性系に対する速度 $\mathbf{v}_{i,m}[k]$ は次式で表される.

$$\mathbf{v}_{i,m}[k] = \mathbf{v}_i[k] + \boldsymbol{\omega}_i[k] \times \mathbf{R}_i[k]^i \mathbf{p}_{i,m}[k] + \mathbf{R}_i[k]^i \mathbf{v}_{i,m}[k] \quad (1)$$

ここで, \mathbf{v}_i , \mathbf{R}_i , $\boldsymbol{\omega}_i$ はそれぞれリンク i の慣性系に対する速度, 姿勢, 角速度であり, ${}^i \mathbf{p}_{i,m}$, ${}^i \mathbf{v}_{i,m}$ はそれぞれリンク i に固定された座標系に対するリンク i 上の点の位置および速度である. \mathbf{R}_i , $\boldsymbol{\omega}_i$ はエンコーダで計測される関節変位 \mathbf{q} および筆者らの先行研究⁽¹⁰⁾による体幹姿勢 \mathbf{R}_B と体幹角速度 $\boldsymbol{\omega}_B$ から求まる. また, \mathbf{v}_i の求め方は後の章で述べる. 仮に, 瞬間的に $\mathbf{v}_{i,m} = \mathbf{0}$ となる点 ${}^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k]$ が見つければ, その点まわりに運動しているとみなせるので, 次式によりリンク i の位置 \mathbf{p}_i が求まる.

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_i[k+1] &= \mathbf{p}_{i,m}[k; k+1] - \mathbf{R}_i[k+1]^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k+1] \\ &\simeq \mathbf{p}_{i,m}[k; k] - \mathbf{R}_i[k+1]^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k] \end{aligned} \quad (2)$$

しかし, ${}^i \mathbf{v}_{i,m}$ が未知である.

そこで, 次の2つの仮定を置く.

1. ${}^i \mathbf{v}_{i,m}$ は十分小さく無視できる
2. $\mathbf{v}_{i,m}$ はリンク i 上で慣性系に対する速度が最小となる点の速度である

ここで, 式(1)に仮定1と仮定2を適用し $\mathbf{v}_{i,m}$ を最小とするためには, 次の評価関数を最小とすればよい.

$$E_1 = \frac{1}{2} \|\mathbf{v}_i[k] + \boldsymbol{\omega}_i[k] \times \mathbf{R}_i[k]^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k]\|^2 \quad (3)$$

これを最小とする ${}^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k]$ は次式で表される.

$${}^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k] = \frac{\boldsymbol{\omega}_i[k] \times \mathbf{v}_i[k]}{\boldsymbol{\omega}_i^T[k] \boldsymbol{\omega}_i[k]} + c \boldsymbol{\omega}_i[k] \quad (c = \text{const.}) \quad (4)$$

しかし, この場合 $\boldsymbol{\omega}_i[k] \simeq \mathbf{0}$ のとき計算が不安定となる問題が生じる. そこで, 次の仮定を追加することでこの問題を回避する.

3. $\mathbf{p}_{i,m}$ は時間に対して連続性をもつ

これらの仮定のもと, 次の評価関数を最小にする ${}^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k]$ を瞬間速度最小点と定義する.

$$E = E_1 + \frac{1}{T_m^2} E_2 \quad (5)$$

ただし,

$$E_2 = \frac{1}{2} \|\mathbf{p}_{i,m}[k; k] - \mathbf{p}_{i,m}[k-1; k-1]\|^2 \quad (6)$$

であり, T_m は連続性の影響を与えるための重みである. E を ${}^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k]$ で偏微分し, 停留条件を整理すると次の方程式が得られる.

$$\mathbf{A}[k]^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k] = \mathbf{b}[k] \quad (7)$$

ここで,

$$\mathbf{A}[k] = \frac{1}{T_m^2} \mathbf{1} - [(\mathbf{R}_i^T[k] \boldsymbol{\omega}_i[k]) \times]^2 \quad (8)$$

$$\mathbf{b}[k] = \frac{1}{T_m^2} \mathbf{p}_{i,m}[k-1; k-1] + \mathbf{R}_i^T[k] [\boldsymbol{\omega}_i[k] \times] \mathbf{v}_i[k] \quad (9)$$

である. ここで, $T_m \rightarrow 0$ のとき, E_2 のみを最小化するため, ${}^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k]$ は初期値 ${}^i \mathbf{p}_{i,m}[0; 0]$ から変動しない. 一方, $T_m \rightarrow \infty$ のとき, E_1 のみを最小化するため, ${}^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k]$ が真の速度最小点になることが期待されるが, $\mathbf{A}[k]$ はフルランクとならず, 式(7)の解は直線となる. さらに, $\boldsymbol{\omega}_i[k] = \mathbf{0}$ のとき, ${}^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k]$ は一意に定まらない. T_m を有限の値とすると, $\boldsymbol{\omega}_i[k]$ によらず $\mathbf{A}[k]$ は常にフルランクとなる. T_m が小さいとき E_2 の影響が大きくなるため ${}^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k]$ の時間変化は小さくなる. 式(7)は次の解をもつ.

$${}^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k] = \mathbf{A}^{-1}[k] \mathbf{b}[k] \quad (10)$$

また, 最小速度 $\mathbf{v}_{i,m}[k]$ は次式より求まる.

$$\mathbf{v}_{i,m}[k] = \mathbf{v}_i[k] + \boldsymbol{\omega}_i[k] \times \mathbf{R}_i[k]^i \mathbf{p}_{i,m}[k; k] \quad (11)$$

理想的には $\mathbf{v}_{i,m}[k] = \mathbf{0}$ だが, 滑りや跳躍がある場合, 並進速度は非零となる.

3. 瞬間速度最小点を用いたデッドレコニング

3.1 瞬間速度最小点による体幹位置計算 体幹の初期位置 $\mathbf{p}_B[0]$ と速度 $\mathbf{v}_B[0]$ および、慣性系に対する瞬間速度最小点の位置 $\mathbf{p}_{i,m}[0;0]$ と速度 $\mathbf{v}_{i,m}[0;0]$, リンク i に対する瞬間速度最小点の位置 ${}^i\mathbf{p}_{i,m}[0;0]$ は既知であるとしよう.

式 (11) の最小速度をもつため, リンク i の位置 $\mathbf{p}_i[k]$ は次式で更新される.

$$\mathbf{p}_i[k] = \mathbf{p}_{i,m}[k-1;k-1] + \mathbf{v}_{i,m}[k-1;k-1]\Delta T - \mathbf{R}_i[k] {}^i\mathbf{p}_{i,m}[k-1;k-1] \quad (12)$$

運動学より, リンク i の位置からの体幹位置 $\mathbf{p}_{B,i}[k]$ は

$$\mathbf{p}_{B,i}[k] = \mathbf{p}_i[k] - \mathbf{R}_B[k] {}^B\mathbf{p}_i[k] \quad (13)$$

で計算される. ここで, ${}^B\mathbf{p}_i[k]$ は体幹に対するリンク i の位置である. 二脚ロボットの運動において, 慣性系に対して動かないような点をもつリンクは支持脚の足先リンクと考えられる. しかし, 両足が接地しているときやセンサオフセットが大きいとき支持脚の判別は難しい. そこで, 本研究では, 反力の大きさと地面に対する足の動きにくさには相関があると仮定し, 各足からの体幹位置推定値 $\mathbf{p}_{B,L}[k]$ と $\mathbf{p}_{B,R}[k]$ に対して各足の反力に基づく重み付けしたものを体幹位置推定値とする.

$$\hat{\mathbf{p}}_B[k] = \frac{F_{z,L} + \frac{1}{2}Mg}{F_{z,L} + F_{z,R} + Mg} \mathbf{p}_{B,L}[k] + \frac{F_{z,R} + \frac{1}{2}Mg}{F_{z,L} + F_{z,R} + Mg} \mathbf{p}_{B,R}[k] \quad (14)$$

ここで, $F_{z,L}$ と $F_{z,R}$ はそれぞれ左足と右足にかかる床反力の鉛直方向成分, M はロボットの質量, g は重力加速度である. $\mathbf{p}_{B,i}[k]$ と $\hat{\mathbf{p}}_B[k]$ の間には差が生じる. そこで, 整合性をとるために次式のように $\mathbf{p}_{i,m}[k;k]$ を更新する.

$$\mathbf{p}_{i,m}[k;k] = \mathbf{p}_i[k] + \mathbf{R}_i[k] {}^i\mathbf{p}_{i,m}[k;k] + (\hat{\mathbf{p}}_B[k] - \mathbf{p}_{B,i}[k]) \quad (15)$$

3.2 加速度センサ情報による体幹位置 体幹に加速度センサを設置しているとする. 加速度センサで問題となるドリフトは低周波数領域に生じるため, 加速度センサ出力 ${}^B\mathbf{a}_{B,\text{mes}}[k]$ を次式により変換した体幹加速度 $\mathbf{a}_{B,\text{mes}}[k]$ を, 高周波数成分の推定に用いる.

$$\mathbf{a}_{B,\text{mes}}[k] = \mathbf{R}_B[k] {}^B\mathbf{a}_{B,\text{mes}}[k] - \mathbf{g} \quad (16)$$

ここで, \mathbf{g} は重力加速度である.

3.3 反力情報に基づくフィルタ周波数の決定法

二脚ロボットの運動には両脚の足先が宙に浮く跳躍動作も含まれる. 歩行動作に比べて跳躍動作では加速度センサを用いた推定値の方がより信頼できると考えられるため, フィルタ周波数を適応的に変化するように設計する必要がある. そこで, フィルタ周波数 f_T を力センサ出力 F に基づいて変化させる. 足が宙に浮いた場合 ($F = 0$), 加速度センサ出力の低周波成分まで使うためには f_T を小さくする必要があるが, あまり小さいとドリフトの影響が大きくなる. 一方で, 足が接地しているとき, 加速度センサ出力は高周波成分のみを使うようにするため, f_T を大きくする必要がある. これらから, 次のような関数を考えた.

$$f_T(F) = \begin{cases} f_{T,\min} & (F \leq 0) \\ \hat{f}_T(F) & (0 \leq F \leq Mg) \\ f_{T,\max} & (Mg \leq F) \end{cases} \quad (17)$$

また, $\hat{f}_T(F)$ は次の条件を満たす単調増加関数である.

$$\begin{aligned} \hat{f}_T(0) &= f_{T,\min}, & \hat{f}_T(Mg) &= f_{T,\max} \\ \left. \frac{d\hat{f}_T}{dF} \right|_{F=0} &= 0, & \left. \frac{d\hat{f}_T}{dF} \right|_{F=Mg} &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

上記の条件を満たす関数 $\hat{f}_T(F)$ を表現するために, 次のような 3 次関数として実装した.

$$\hat{f}_T(F) = a_0 + a_1F + a_2F^2 + a_3F^3 \quad (19)$$

ここで, 各係数は以下のようになる.

$$\begin{aligned} a_0 &= f_{T,\min}, & a_1 &= 0 \\ a_2 &= \frac{3}{(Mg)^2} (f_{T,\max} - f_{T,\min}) \\ a_3 &= -\frac{2}{(Mg)^3} (f_{T,\max} - f_{T,\min}) \end{aligned}$$

3.4 体幹速度推定のための相補フィルタ

瞬間速度最小点の計算において, 体幹速度と関節変位から求まるリンク速度が必要となる. 本研究では, 体幹速度を次の相補フィルタによる速度とした.

$$\mathbf{v}_{B,\text{est}} = \mathbf{H}_{v1}(z)\mathbf{v}_{B,\text{fix}} + \mathbf{H}_{v2}(z)\mathbf{a}_B \quad (20)$$

ここで, $\mathbf{v}_{B,\text{fix}}$ は支持脚の足先が慣性系に対して静止していると仮定した際の体幹速度であり, $\mathbf{H}_{v1}(z)$, $\mathbf{H}_{v2}(z)$ は

$$\mathbf{F}_{v1}(s) = \frac{1}{1 + T_v s} \mathbf{1} \quad (21)$$

$$\frac{1}{s} \cdot \mathbf{F}_{v2}(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{T_v s}{1 + T_v s} \mathbf{1} \quad (22)$$

をそれぞれ双一次変換したものであり, $\mathbf{F}_{v1}(s)$ と $\mathbf{F}_{v2}(s)$ は相補条件 $\mathbf{F}_{v1}(s) + \mathbf{F}_{v2}(s) = \mathbf{1}$ を満たす. また, $T_v = 1/(2\pi f_v)$ は前節の周波数決定法に基づいて決定した.

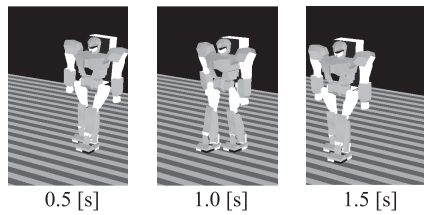


Fig. 2 Snapshots of a simulation of forward walking

Table 1 Estimation error of forward walking at $T_m=10$ with the filter for velocity

RMSE [mm]	x	y	z	total
M1	9.290	17.39	4.440	31.12
M2	20.64	26.00	35.38	82.02
M3-1	7.987	18.09	4.319	30.40
M3-2	6.316	18.90	4.630	29.85
PB	7.183	18.08	4.415	29.68
P1	5.843	14.80	4.121	24.76
P2	4.985	14.81	4.924	24.72
P3	5.811	15.37	4.037	25.22
P4	4.974	15.24	4.874	25.08

3.5 体幹位置推定のための相補フィルタ 最終的に、推定値 $p_{B,est}[k]$ は次式により計算される。

$$p_{B,est}[k] = H_1(z)a_{B,mes}[k] + H_2(z)\hat{p}_B[k] \quad (23)$$

ここで、 $H_1(z)$ 、 $H_2(z)$ は加速度側の $1/s^2$ を相殺するために設計した次のような相補フィルタをそれぞれ双一次変換したものである。

$$\frac{1}{s^2}F_1(s) = \frac{1}{s^2} \frac{T_f^2 s^2}{1 + 2T_f s + T_f^2 s^2} \mathbf{1}_3 \quad (24)$$

$$F_2(s) = \frac{1 + 2T_f s}{1 + 2T_f s + T_f^2 s^2} \mathbf{1}_3 \quad (25)$$

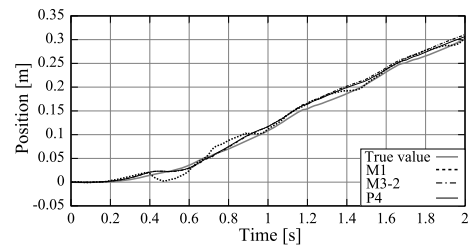
ここで、 $T_f = 1/(2\pi f_f)$ は前節の周波数決定法に基づいて決定し、 $F_1(s)$ と $F_2(s)$ は相補条件 $F_1(s) + F_2(s) = 1$ を満たす。

4. シミュレーション結果

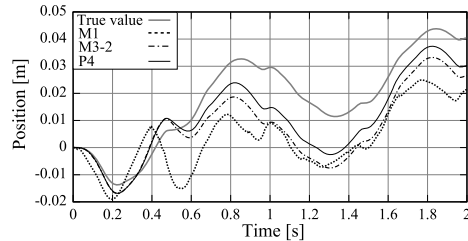
4.1 シミュレーション環境 人型ロボット mighty⁽¹¹⁾のモデルを用い、OpenHRP3⁽¹²⁾による動力学シミュレーションを行った。ここで実環境における場所ごとの摩擦条件の変化を再現するために、摩擦係数を 0.1, 0.5 とした路面を交互に配置した縞状の路面を用いた。シミュレータに与える動力学計算のための関節データは、あらかじめ寺田らの方法⁽¹³⁾により計算したものをを用いた。

シミュレーションでは次の 8 つの方法を比較した。

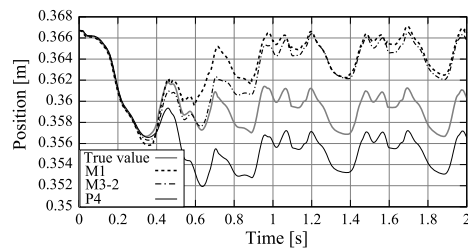
M1. 支持脚の足先が慣性系に対して静止しているとした運動学計算



(a) x-direction



(b) y-direction



(c) z-direction

Fig. 3 An example of the estimation result for forward walking with time constant determination

M2. 加速度の 2 階積分 + HPF

M3-1. (M1+LPF)+(加速度 2 階積分+HPF), 時定数固定

M3-2. (M1+LPF)+(加速度 2 階積分+HPF), 時定数決定法適用

PB. 文献⁽⁹⁾の方法 ($\epsilon = 0.01$)

P1. 提案方法 (T_f : 固定, T_v : 固定)

P2. 提案方法 (T_f : 決定法適用, T_v : 固定)

P3. 提案方法 (T_f : 固定, T_v : 決定法適用)

P4. 提案方法 (T_f : 決定法適用, T_v : 決定法適用)

M3-1, M3-2, PB のフィルタは提案方法のフィルタと同一のものである。決定法として式(19)を用い、 T_f においては $f_{T,max}=0.5[\text{Hz}]$, $f_{T,min}=0.001[\text{Hz}]$ とし、 T_v においては $f_{T,max}=50[\text{Hz}]$, $f_{T,min}=0.001[\text{Hz}]$ とした。また、 $Mg \approx 54.20[\text{N}]$ とし、変数 F として床反力の鉛直方向成分を用いた。後の節で示すシミュレーション結果は、正規分布に基づいて選択した 10 の加速度センサのオフセット誤差を与えた結果である。

4.2 前進歩行動作に対するデッドレコニング シミュレーションの様子を図 2 に示す。また、二乗平均誤差 (RMSE) を表 1 に示し、推定結果の一例を図 3 に

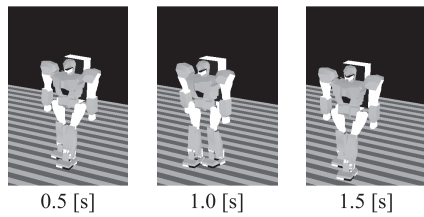


Fig. 4 Snapshots of a simulation of turn walking

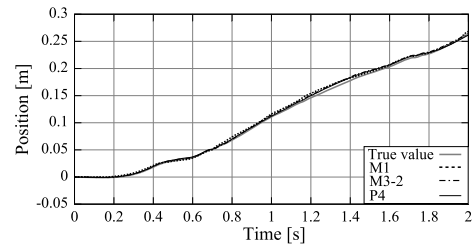
Table 2 Estimation error of turn walking at $T_m=10$ with the filter for velocity

RMSE [mm]	x	y	z	total
M1	3.895	12.90	1.997	18.79
M2	21.09	25.59	35.28	81.96
M3-1	4.727	12.04	3.307	20.08
M3-2	5.106	12.01	3.725	20.84
PB	4.102	11.37	3.976	19.45
P1	4.044	9.278	4.039	17.36
P2	4.013	9.529	4.485	18.03
P3	4.668	9.725	4.183	18.58
P4	4.551	9.934	4.594	19.08

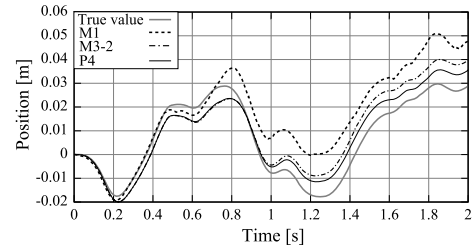
示す。結果から、M2では累積誤差の影響により二乗平均誤差が大きい。一方で、M3とPBおよび提案方法では累積誤差の影響を低減できていることが確認できる。M3と提案方法を比較すると、提案方法は二乗平均誤差を15[%]程度低減できている。PBと提案方法を比較しても同程度の低減が確認できる。また、提案方法はM1に比べ誤差を小さくできている。時定数決定法の有無に着目すると、若干の誤差変動が見られる。これは、時定数が小さくなることで加速度センサのオフセットの影響がより強くなるためだと考えられる。

4.3 旋回歩行動作に対するデッドレコニング シミュレーションの様子を図4に示す。ここで、半径0.5[m]、中心 $[0.0\ 0.5\ 0.0]^T$ の x - y 平面における円に沿って旋回するように2秒間歩行させた。二乗平均誤差を表2に示し、推定結果の一例を図5に示す。前進歩行動作のときと同様に、M2で見られた累積誤差の影響をM3とPBおよび提案方法では低減できている。また、提案方法はM3と比べて、二乗平均誤差を5[%]から15[%]程度低減できており、M1と同程度の誤差である。PBと提案方法を比較すると、若干の二乗平均誤差の低減が確認できる。時定数決定法の有無についても、前進歩行動作と同様に若干の誤差変動が見られる。

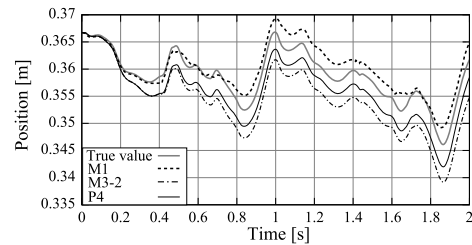
4.4 跳躍動作に対するデッドレコニング この節では、両足が路面から離れ、前方に着地する跳躍動作の結果を示す。1[s]付近で跳躍し、その後4[s]まで静止するようにした。シミュレーションの様子を図6に示す。また、二乗平均誤差を表3に示し、推定結果



(a) x-direction



(b) y-direction



(c) z-direction

Fig. 5 An example of the estimation result for turn walking with time constant determination

の一例を図7に示す。結果から、M1では跳躍動作中の前進を検出できていないことがわかる。そのため、M3およびPBではM1の値に収束する傾向が見られる。しかし、M3-1とM3-2を比較すると、時定数決定法を適用したM3-2のほうが誤差が小さいことがわかる。このことから、両足が浮くような跳躍動作では時定数決定法が有効であるといえる。また、提案方法においてもP1とP2ではM1の値への収束が見られる。一方で、速度推定を行ったP3とP4では若干の偏差があるものの、M1と比較して35[%]から40[%]程度誤差を低減している。

5. おわりに

本研究では、短期間における高速かつ高精度な体幹位置推定を目的とし、足の運動に対する瞬間速度最小点を用いた推定方法を提案した。特異点を回避した瞬間速度最小点の計算法と反力情報に基づくフィルタ時定数の決定法を実装した提案方法では、人型ロボットを用いたシミュレーションにおいて、前進歩行動作、旋回歩行動作、跳躍動作のいずれにおいても誤差の低

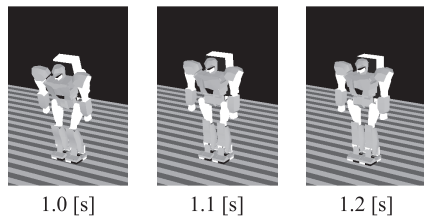


Fig. 6 Snapshots of a simulation of jumping

Table 3 Estimation error of jumping at $T_m=10$ from 0[s] to 4[s] with the filter for velocity

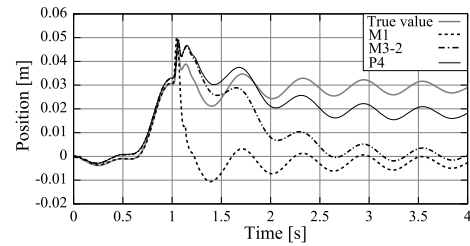
RMSE [mm]	x	y	z	total
M1	26.94	0.7441	1.122	28.80
M2	93.15	99.40	142.0	334.5
M3-1	26.33	2.571	3.745	32.65
M3-2	20.48	2.869	3.836	27.19
PB	26.00	2.494	3.820	32.31
P1	26.96	2.824	4.008	33.79
P2	21.15	3.130	4.141	28.42
P3	11.43	2.885	5.104	19.42
P4	9.056	3.186	5.144	17.39

減が確認できた。特に、速度推定を組み合わせることで跳躍動作後の静止状態での誤差を改善できた。

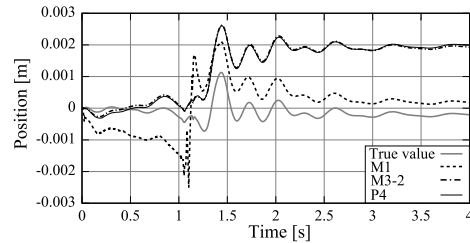
謝辞 本研究は、科学研究費補助金若手研究 (A) 内課題「力学変容系としての人の運動理解と次世代人型ロボット制御の基盤構築」(課題番号:22680018) の支援を受けた。

参考文献

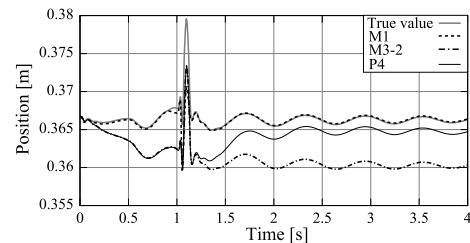
- (1) S. Thompson and S. Kagami, "Humanoid Robot Localisation using Stereo Vision", *Proc. of 2005 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp.19-25, 2005.
- (2) 西脇, チェスナット, 加賀美, "ヒューマノイドによる未知不整地のレーザ距離センサを用いた自律移動", 第17回ロボティクスシンポジウム, (2012), pp.611-617.
- (3) J. L. Crowley, "Asynchronous control of orientation and displacement in a robot vehicle", *Proc. of the 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol.3, (1989), pp.1277-1282.
- (4) F. Chenavier, J. L. Crowley, Position Estimation for a Mobile Robot Using Vision and Odometry. *Proc. of The 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1992), pp.2588-2593.
- (5) 本村, 松岡, 長谷川, 倉爪, "二つのランドマーク方位計測とデッドレコニングに基づく実時間自己位置同定法", 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.3(2005), pp.311-320.
- (6) 大野, 坪内, 重松, 前山, 油田, "DGPS とオドメトリを用いた地図に基づく屋外ナビゲーションの試行", 第20回日本ロボット学会学術講演会, 3A31, (2002).
- (7) 増田, 前, 新井, 井上, "脚移動型ロボットのデッドレコニング", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-73-105, (2000).



(a) x-direction



(b) y-direction



(c) z-direction

Fig. 7 An example of the estimation result for jumping with time constant determination

- (8) 泉田, ワシン, 伏見, 藤原, 菅沼, "脚型ローバのデッドレコニング", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A2-M10, (2007).
- (9) 舩屋, 杉原, "瞬間速度最小点を用いた二脚ロボットのオドメトリ", 第30回日本ロボット学会学術講演会, 3H1-8, (2012).
- (10) K. Masuya, T. Sugihara and M. Yamamoto, "Design of Complementary Filter for High-fidelity Attitude Estimation based on Sensor Dynamics Compensation with Decoupled Properties", *Proc. of The 2012 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2012), pp.606-611.
- (11) T. Sugihara, K. Yamamoto and Y. Nakamura, "Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots", *Robotics and Autonomous System*, Vol.56, Issue 1(2007), pp.82-94.
- (12) S. Nakaoka, S. Hattori, F. Kanehiro, S. Kajita and H. Hirukawa, "Constraint-based Dynamics Simulator for Humanoid Robots with Shock Absorbing Mechanisms," *Proc. of The 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (2007), pp.3641-3647.
- (13) 寺田, 杉原, 國吉, "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).