

接触点の運動推定に基づく二脚ロボットのデッドレコニング

Dead Reckoning of a Biped Robot based on the Estimation of the Contact Points

○ 舂屋 賢 (阪大) 杉原 知道 (阪大)

Ken Masuya, Osaka University, ken.masuya@ams.eng.osaka-u.ac.jp

Tomomichi Sugihara, Osaka University

A novel technique of dead reckoning for biped robots based on the estimation of contact points is proposed. In our previous work, that point is calculated on the assumption that its velocity with respect to the link frame is ignored. Although its assumption is reasonable in the case of the rotation about the fixed contact point, it is not appropriate in the case of the rolling contact in which the contact point moves. For this problem, we propose a novel method to calculate the instantaneous minimum velocity point. This method calculates the position and velocity with respect to the link frame at the same time. The validity of the proposed method is verified through a simulation of the robot motion with toe and heel contact

Key Words: Biped robot, Dead reckoning, Complementary filter, Contact point estimation

1. はじめに

人型ロボットの位置制御において、現在位置を高精度に推定する技術は重要である。カメラ [1] やレーザ距離計 [2][3] などのいわゆる外界センサによる推定は、そのような技術のひとつである。しかし、これらは制御周期に比べて計測周期が比較的遅く、高速なフィードバックへの利用には適さない。そのため、比較的高速に計測できる内界センサによるデッドレコニングが必要となる。

加速度センサ信号の2階積分はそのための方法のひとつの候補である。これは、速い運動については比較的信頼できるが、遅い運動に対しては誤差累積の影響を免れず、推定精度は低い。一方で、脚ロボットのデッドレコニングとして、支持脚の足先に基づく運動学計算が提案されている [4][5][6]。慣性系に対して足先が動かないとき良好な精度が得られるが、実際の運動に見られる転がりや回転により推定精度が劣化する。

これまでに筆者らは、足先リンクにおいて瞬間的に速度が最小となる点 (瞬間速度最小点) に基づいた位置推定法を提案し [7]、さらに力センサ情報に基づいてフィルタ周波数を適応的に変化させる方法を提案した [8]。これらにおいて、リンクに対する瞬間速度最小点の速度は微小時間において零であると仮定して位置推定を行った。この仮定は接触点が固定であるとき妥当であるが、足先が転がり接触を行うとき前述の速度は無視できない。本稿では、リンクに対する位置と速度を同時に求めるための新しい評価関数に基づく推定法を提案する。踵、足裏、つま先をもつロボットモデルを用いたシミュレーションにより有効性を確認した。

2. 反力情報と瞬間速度最小点に基づく二脚ロボットのデッドレコニング [8]

2.1 瞬間速度最小点の計算

体幹リンク座標系 Σ_0 と足先リンク座標系 Σ_i の運動の関係は

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_0 + \mathbf{R}_0^0 \mathbf{p}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_0 + [\boldsymbol{\omega}_0 \times] \mathbf{R}_0^0 \mathbf{p}_i + \mathbf{R}_0^0 \mathbf{v}_i \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_0^0 \mathbf{R}_i \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\omega}_0 + \mathbf{R}_0^0 \boldsymbol{\omega}_i \quad (4)$$

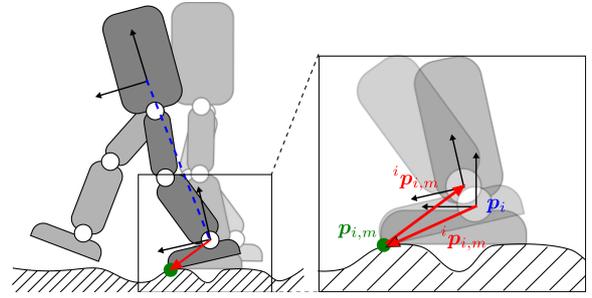


Fig.1 Updating of link position based on the instantaneous minimum velocity point

と表される。ここで、 \mathbf{p}_* , \mathbf{R}_* , \mathbf{v}_* , $\boldsymbol{\omega}_*$ はそれぞれ慣性系に対する Σ_* の位置、姿勢、速度、角速度である。姿勢および角速度は筆者らが提案した姿勢推定技術により求まる [9]。また、 ${}^0\mathbf{p}_i$, ${}^0\mathbf{v}_i$, ${}^0\mathbf{R}_i$, ${}^0\boldsymbol{\omega}_i$ は Σ_0 に対する Σ_i の位置、姿勢、速度、角速度であり、関節変位 \mathbf{q} および関節速度 $\dot{\mathbf{q}}$ から運動学的に求まる。同様に、慣性系に対するリンク i 上のある点の位置と速度は、 Σ_i の運動情報を用いて次式のように表される。

$$\mathbf{p}_{i,m} = \mathbf{p}_i + \mathbf{R}_i {}^i\mathbf{p}_{i,m} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{i,m} = \mathbf{v}_i + [\boldsymbol{\omega}_i \times] \mathbf{R}_i {}^i\mathbf{p}_{i,m} + \mathbf{R}_i {}^i\mathbf{v}_{i,m} \quad (6)$$

$\mathbf{p}_{i,m}$, $\mathbf{v}_{i,m}$ はそれぞれ慣性系に対するある点の Σ_i の情報に基づく位置と速度であり、 ${}^i\mathbf{p}_{i,m}$ と ${}^i\mathbf{v}_{i,m}$ はそれぞれ Σ_i に対する前述の位置と速度である。もし $\mathbf{p}_{i,m}$ が瞬間的に慣性系に対して静止しているとき、式 (6) の左辺を零とするような ${}^i\mathbf{p}_{i,m}$ が求めれば、式 (5) および式 (1) より体幹位置を計算できる (図 1)。

筆者らは微小時間において ${}^i\mathbf{v}_{i,m} \approx \mathbf{0}$ と仮定し、次のような評価関数を最小化する ${}^i\mathbf{p}_{i,m}$ を瞬間速度最小点として求めた。

$$E = E_1 + \frac{1}{T_m^2} E_2 \quad (7)$$

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

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

ここで、サンプリング間隔を ΔT とし、 $*[k]$ は変数 $*$ の離散時刻 $k\Delta T$ における値とする。 T_m は重みを表すパラメータである。

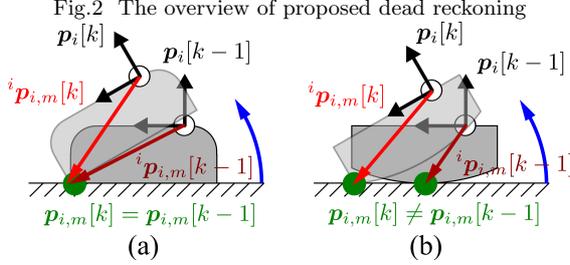
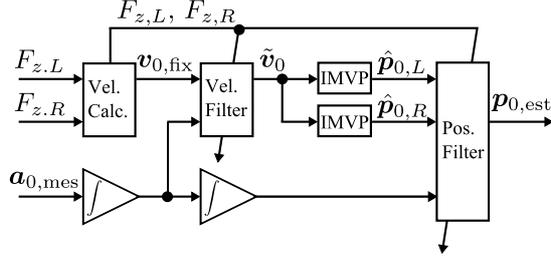


Fig.3 The instantaneous minimum velocity point of contact foot (a)Rotation around a point (b)Rolling contact

$T_m \rightarrow \infty$ のとき E_1 のみを最小化するが、 $\omega_i[k] \simeq \mathbf{0}$ のとき計算が不安定化する．一方で、 $T_m \rightarrow 0$ のとき、 ${}^i\mathbf{p}_{i,m}[k]$ は初期値から変動しない．また、 $T_m \rightarrow 0$ が小さいとき、 ${}^i\mathbf{p}_{i,m}[k]$ の時間変化は小さくなる． $\mathbf{v}_i[k]$ は、式 (2) から求まる．ただし、支持脚の足先が慣性系に対して動かないとした体幹速度 $\mathbf{v}_{0,\text{fix}}[k]$ と加速度センサ情報 $\mathbf{a}_{0,\text{mes}}[k]$ の 1 階積分に対して、相補フィルタを用いて得られた体幹速度の一時推定値 $\tilde{\mathbf{v}}_0[k]$ を体幹速度として用いた．ここで、フィルタ周波数は反力情報により決定される．

2.2 瞬間速度最小点に基づくデッドレコニング

デッドレコニングの概要図を図 2 に示す． Σ_0 に関する初期値 $\mathbf{p}_0[0]$ 、 $\mathbf{v}_0[0]$ 、瞬間速度最小点に関する初期値 ${}^i\mathbf{p}_{i,m}[0]$ 、 $\mathbf{v}_{i,m}[0]$ 、 ${}^i\mathbf{p}_{i,m}[0]$ は既知であるとする．リンク位置は次式で更新される．

$$\mathbf{p}_i[k] = \mathbf{p}_{i,m}[k-1] + \mathbf{v}_{i,m}[k-1]\Delta T - \mathbf{R}_i[k] {}^i\mathbf{p}_{i,m}[k-1] \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{v}_{i,m}[k-1]$ は残留速度であり、次式で表される．

$$\mathbf{v}_{i,m}[k] = \mathbf{v}_i[k] + \omega_i[k] \times \mathbf{R}_i[k] {}^i\mathbf{p}_{i,m}[k] \quad (9)$$

式 (1) より Σ_i の情報から得られる体幹位置 $\hat{\mathbf{p}}_{0,i}[k]$ は

$$\hat{\mathbf{p}}_{0,i}[k] = \mathbf{p}_i[k] - \mathbf{R}_0[k] {}^0\mathbf{p}_i[k] \quad (10)$$

で計算される．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側と考えられる．支持脚の判別を反力に基づいて行くとし、各脚から得られる体幹位置 $\hat{\mathbf{p}}_{0,i}$ に対して反力の鉛直方向成分 $F_{z,i}$ により重み付けしたものを体幹位置推定値 $\hat{\mathbf{p}}_0$ とする．

$$\hat{\mathbf{p}}_0[k] = w_L \hat{\mathbf{p}}_{0,L}[k] + w_R \hat{\mathbf{p}}_{0,R}[k] \quad (11)$$

$$w_i = \frac{F_{z,i} + \epsilon_F}{F_{z,L} + F_{z,R} + 2\epsilon_F}, \quad (i = L, R) \quad (12)$$

ここで、 ϵ_F は分母を零としないためのパラメータであり、文献 [8] ではロボットの質量 M と重心加速度 g を用いて、 $\epsilon_F = Mg$ とした．また、 $\hat{\mathbf{p}}_{0,i}[k]$ と $\hat{\mathbf{p}}_0[k]$ の間には差が生じ、時間経過に伴

い累積する．そのため、次式のようにして $\mathbf{p}_{i,m}[k]$ を更新する．

$$\mathbf{p}_{i,m}[k] = \mathbf{p}_i[k] + \mathbf{R}_i[k] {}^i\mathbf{p}_{i,m}[k] + (\hat{\mathbf{p}}_0[k] - \hat{\mathbf{p}}_{0,i}[k]) \quad (13)$$

最終的に、推定値 $\mathbf{p}_{0,\text{est}}[k]$ は、瞬間速度最小点に基づく体幹位置 $\hat{\mathbf{p}}_0[k]$ と加速度センサ情報 $\mathbf{a}_{0,\text{mes}}[k]$ の 2 階積分を用いて次式のような相補フィルタにより求める．

$$\mathbf{p}_{0,\text{est}}[k] = \mathbf{H}_1(z)\mathbf{a}_{0,\text{mes}}[k] + \mathbf{H}_2(z)\hat{\mathbf{p}}_0[k] \quad (14)$$

ここで、 $\mathbf{H}_1(z)$ 、 $\mathbf{H}_2(z)$ は次のフィルタをそれぞれ双一次変換したものである．

$$\frac{1}{s^2} \mathbf{F}_1(s) = \frac{1}{s^2} \frac{T_f^2 s^2}{1 + 2T_f s + T_f^2 s^2} \mathbf{1}_3$$

$$\mathbf{F}_2(s) = \frac{1 + 2T_f s}{1 + 2T_f s + T_f^2 s^2} \mathbf{1}_3$$

フィルタ時定数 T_f は反力情報により決定される．

3. リンク系に対する速度を考慮した瞬間速度最小点によるデッドレコニング

前章に示したように、筆者らは微小時間において ${}^i\mathbf{v}_{i,m} \simeq \mathbf{0}$ とおいて、瞬間速度最小点の計算を行った．これは図 3(a) のような変化しない接触点のまわりをリンクが動くとき、妥当な仮定といえる．しかし、図 3(b) に示す転がり接触のようなリンク変動とともに接触点も動く場合、 ${}^i\mathbf{p}_{i,m}$ の時間変化、すなわち ${}^i\mathbf{v}_{i,m}$ は無視できない．そこで本稿では、 ${}^i\mathbf{p}_{i,m}$ に加えて ${}^i\mathbf{v}_{i,m}$ も同時に求める新しい計算方法を提案する．

${}^i\mathbf{x}_{i,m}[k] \equiv [{}^i\mathbf{p}_{i,m}[k] \ {}^i\mathbf{v}_{i,m}[k]]^T$ とすると、式 (6) は次式のように書き直される．

$$\mathbf{v}_{i,m}[k] = \mathbf{v}_i[k] + \Gamma_i[k] {}^i\mathbf{x}_{i,m}[k] \quad (15)$$

$$\Gamma_i[k] = \begin{bmatrix} [\omega_i[k] \times] \mathbf{R}_i[k] & \mathbf{R}_i[k] \end{bmatrix}$$

また、差分近似より次式が成り立つ．

$$\mathbf{I}_1 {}^i\mathbf{x}_{i,m}[k] = \mathbf{I}_2 {}^i\mathbf{x}_{i,m}[k-1] \quad (16)$$

$$\mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\Delta T \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

これらの関係に基づく次の評価関数を最小とする ${}^i\mathbf{x}_{i,m}[k]$ を新たに瞬間速度最小点として求める．

$$E = E'_1 + \frac{1}{T_m^2} E'_2 \quad (17)$$

$$E'_1 = \frac{1}{2} \|\mathbf{v}_i[k] + \Gamma_i[k] {}^i\mathbf{x}_{i,m}[k]\|^2$$

$$E'_2 = \frac{1}{2} \|\mathbf{I}_1 {}^i\mathbf{x}_{i,m}[k] - \mathbf{I}_2 {}^i\mathbf{x}_{i,m}[k-1]\|^2$$

ここで、 $0 < T_m < \infty$ は重みとして働くパラメータであり、積分精度が良好な場合は T_m を小さくすればよい．

式 (17) を ${}^i\mathbf{x}_{i,m}[k]$ で偏微分し、停留条件を整理すると

$$\mathbf{A}_i[k] {}^i\mathbf{x}_{i,m}[k] = -\Gamma_i^T[k] \mathbf{v}_i[k] + \frac{1}{T_m^2} \mathbf{I}_1^T \mathbf{I}_2 {}^i\mathbf{x}_{i,m}[k-1] \quad (18)$$

$$\mathbf{A}_i[k] = \Gamma_i^T[k] \Gamma_i[k] + \frac{1}{T_m^2} \mathbf{I}_1^T \mathbf{I}_1 \quad (19)$$

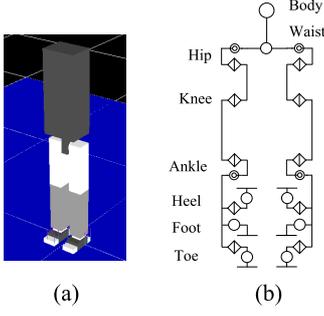


Fig.4 The robot model for simulation (a)The exterior (b)The structure

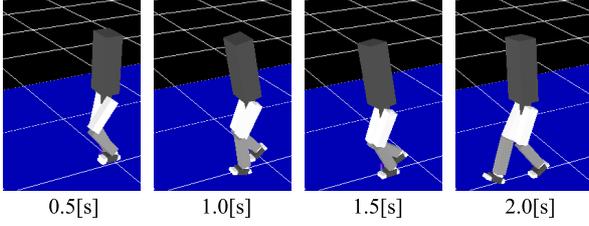


Fig.5 The snapshots of simulation

となる. ここで, $T_m > 0$ のとき $\mathbf{A}_i[k]$ の逆行列が存在すればよい. 第1項は半正定であり, 零となる ${}^i\mathbf{x}_{i,m}[k]$ は

$${}^i\mathbf{v}_{i,m}[k] = -[(\mathbf{R}_i^T[k]\boldsymbol{\omega}_i[k]) \times]^2 {}^i\mathbf{p}_{i,m}[k] \quad (20)$$

を満たす. 第2項もまた半正定であるが, 零となる ${}^i\mathbf{x}_{i,m}[k]$ は

$${}^i\mathbf{p}_{i,m}[k] = \Delta T {}^i\mathbf{v}_{i,m}[k] \quad (21)$$

を満たす. 式 (20) と式 (21) を同時に満たすものは ${}^i\mathbf{x}_{i,m}[k] = \mathbf{0}$ のみであるため, $T_m > 0$ のとき $\mathbf{A}_i[k]$ は正定となり, 式 (18) を解くことができる.

体幹位置推定の方法は, 式 (8) のリンク位置の更新方法および式 (12) の重み計算を除いて, 前述した文献 [8] と同じ方法を用いた. リンク位置の更新は式 (8) の代わりに次式を用いた.

$$\mathbf{p}_i[k] = \mathbf{p}_{i,m}[k-1] - \mathbf{R}_i[k] {}^i\mathbf{p}_{i,m}[k-1] \quad (22)$$

また, 重み計算は式 (12) の代わりに次式を用いた.

$$w_i = \frac{\hat{F}_{z,i} + \epsilon_F}{\hat{F}_{z,L} + \hat{F}_{z,R} + 2\epsilon_F} \quad (23)$$

$$\hat{F}_{z,i} = \begin{cases} Mg & (Mg < F_{z,i}) \\ F_{z,i} & (0 \leq F_{z,i} \leq Mg) \\ 0 & (F_{z,i} < 0) \end{cases}, \quad (i = L, R) \quad (24)$$

ϵ_F は設計パラメータであり, 次章においてこの値に対する推定精度の変化をシミュレーションで確認する.

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション環境

OpenHRP3[10] による動力学シミュレーションを行った. 二脚ロボットのモデルとして図4のような爪先関節, 踵関節をもつ足をもつモデルを用いた. OpenHRP3において, 与えた目標関節変位と目標関節速度に追従するようにPD制御によって関節トルクを生成した. それらの目標値は, Yamamotoら [11] の爪先

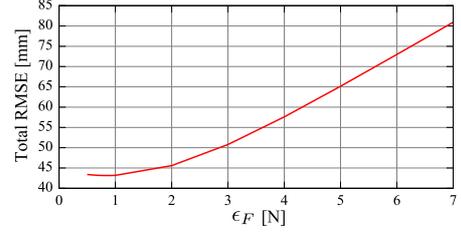


Fig.6 RMSE varied by the effect of ϵ_F

Table 1 Root-Mean-Square-Error of the estimated position ($\epsilon_F = 0.9$, unit:[mm])

Method	x	y	z	total
Method1	26.77	4.202	30.73	61.71
Method2	20.04	25.33	36.52	81.89
Method3	23.70	4.967	34.00	62.66
RS	28.23	5.052	27.27	60.55
Proposed	12.85	4.756	25.54	43.14

Table 2 Root-Mean-Square-Error of the estimated velocity ($\epsilon_F = 0.9$, unit:[mm])

Method	x	y	z	total
Method1	75.67	33.80	101.4	210.8
Method2	28.51	33.13	51.52	113.2
Method3	33.02	16.92	58.59	108.5
RS	38.97	18.00	55.21	112.2
Proposed	36.92	11.07	59.83	107.8

関節を含む境界条件緩和法を参考にし, 踵関節を含む場合の境界条件緩和法によりあらかじめ計算したものをを用いた. 本稿では, 静止摩擦係数および動摩擦係数はともに1とした. OpenHRP3による動力学計算の結果得られた関節情報, 反力情報, 加速度情報を用いて, 推定を行った.

シミュレーションでは, 次の5つの方法を比較した.

Method1 支持足固定とした運動学

Method2 加速度の2階積分+HPF

Method3 M1と加速度の2階積分による相補フィルタ

RS 文献 [8] の方法

Proposed 提案方法

Method3, RS, Proposedにおける位置推定のためのフィルタ周波数は $f_{\max} = 0.5[\text{Hz}]$, $f_{\min} = 0.001[\text{Hz}]$ として文献 [8] の反力情報によるフィルタ周波数決定法により決定した. また, RSおよびProposedにおける速度の一時推定のためのフィルタ周波数は $f_{\max} = 50[\text{Hz}]$, $f_{\min} = 0.001[\text{Hz}]$ として同様の方法により決定した. 瞬間速度最小点の計算におけるパラメータは $T_m = 10$ とした. 評価のために, 加速度センサにランダムに決定した10個のオフセットを加えた場合の二乗平均誤差を計算した.

4.2 足の回転を含む前進歩行の体幹位置推定

図5に示すような前進歩行に対する推定を行った. ここで, 支持脚は踵接地, 足裏接地, 爪先接地と接地部を歩行中に変化させる. ϵ_F を変化させた場合に推定精度がどのように変化するかを表したものが図6である. 約0.9[N]のとき全体の誤差が最小と

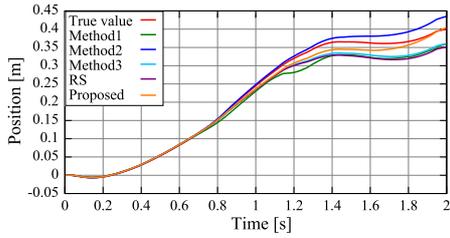
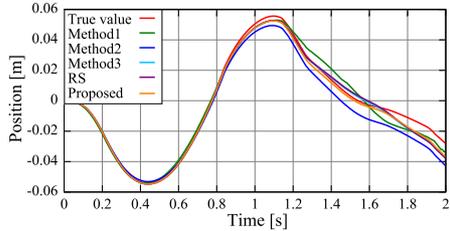
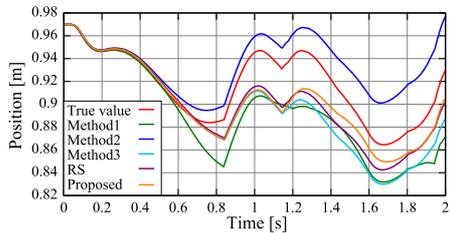
(a) x -direction(b) y -direction(c) z -direction

Fig.7 An result of position estimation

なるため、これを ϵ_F とした。位置推定の誤差を表 1 に示し、結果の一例を図 7 に示す。また、位置推定の結果から得られる推定速度の誤差を表 2 に、結果の一例を図 8 に示す。結果から、推定速度についてはあまり差異が見られなかった。一方で、位置推定において、他の方法に比べて 30% 程度の誤差低減が確認できた。特に進行方向の誤差低減が行えていることがわかる。

5. おわりに

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し、リンク系に対する速度を考慮した瞬間速度最小点による位置推定方法を提案した。さらに、各脚の重みをフィルタパラメータと捉え、それを調整することにより精度向上を図った。シミュレーション結果から、速度推定にあまり差異が見られなかった。しかし、提案方法は他の方法と比較して位置推定において 30% 程度の誤差低減が確認できた。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金若手研究 (A)(課題番号:22680018) の支援を受けた。

文献

- [1] S. Thompson and S. Kagami. Humanoid robot localisation using stereo vision. In *Proc. of the 2005 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 19–25, 2005.
- [2] A. Hornung, K. M. Wurm, and M. Bennewitz. Humanoid robot localization in complex indoor environments. In *Proc. of the 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1690–1695, 2010.
- [3] 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予稿集, pp. 611–617, 2012.

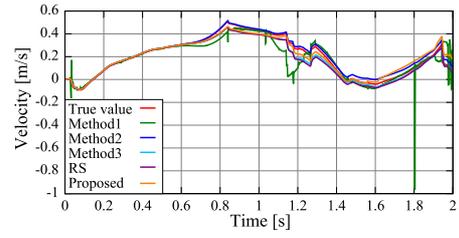
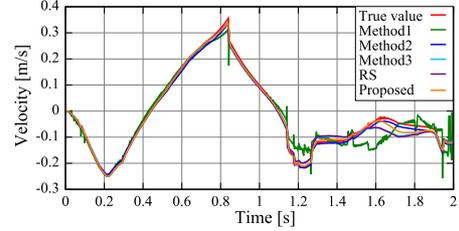
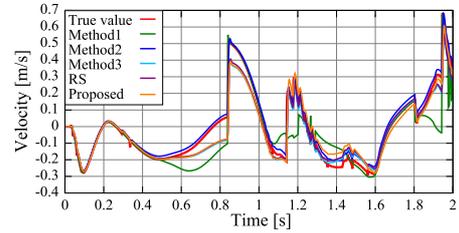
(a) x -direction(b) y -direction(c) z -direction

Fig.8 An result of velocity estimation

- [4] 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 2000 予稿集, 2000. 2A1-73-105.
- [5] 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 2007 予稿集, 2007. 2A2-M10.
- [6] M. Bloesch, M. Hutter, M. Hoepflinger, S. Leutenegger, C. Gehring, C. D. Remy, and R. Siegwart. State estimation for legged robots - consistent fusion of leg kinematics and IMU. In *Proc. of Robotics: Science and Systems*, Sydney, Australia, July 2012.
- [7] 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予稿集, 2012. 3I1-8.
- [8] 舩屋, 杉原. 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. 第 18 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 296–301, 2013.
- [9] K. Masuya, T. Sugihara, and M. Yamamoto. Design of complementary filter for high-fidelity attitude estimation based on sensor dynamics compensation with decoupled properties. In *Proc. of the 2012 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 606–611, 2012.
- [10] S. Nakaoka, S. Hattori, F. Kanehiro, S. Kajita, and H. Hirukawa. Constraint-based dynamics simulator for humanoid robots with shock absorbing mechanisms. In *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3641–3647, 2007.
- [11] K. Yamamoto, T. Sugihara, and Y. Nakamura. Gait planning including toe contact with boundary condition relaxation. In *Proc. of the 17th CISM-IFToMM Symposium*, pp. 409–416, 2008.