

速度フィードバックを含む二段階相補フィルタによる 二脚ロボットのデッドレコニング

○舩屋賢 (阪大) 杉原知道 (阪大)

1. はじめに

不規則かつ高速に移動する二脚ロボットを制御するとき、現在位置の推定は重要である。ひとつの方法は、カメラ [1] やレーザレンジファインダ [2][3] などの外界センサを用いることだが、それらの計測周期は制御周期に比べ遅い。外界センサに比べて、内界センサは比較的高速に計測できることから、本研究では内界センサによる位置計測、すなわちデッドレコニングを考える。

脚ロボットの分野において、支持足が地面に対して動かないとして運動学に基づいて逆算する方法 (KCSF) が用いられている [4]。しかし、支持足が地面上を転がる、接触点周りに回転する、地面から離れるなどの状況では、必然的に精度は劣化する。別の方法として、加速度の二階積分 (DIA) が考えられる。これは高速な運動を比較的精度よく推定できるが、主に低周波数領域の誤差が積分に伴い累積する。これらの問題に対し、Bloesch ら [5] は KCSF と慣性センサの情報を統合する非線形カルマンフィルタを提案した。また、Chilian ら [6] は前述の二つに加えカメラ情報を組み合わせる情報フィルタにより推定を行った。しかし、これらは依然として支持足が回転などを行う場合の問題に対応していない。さらに、それらのフィルタは信号の統計的性質を必要とするため、パラメータの調整が難しい。

上記の問題に対して、これまでに筆者ら [7][8] は、運動学計算と加速度情報を統合する相補フィルタを提案した。相補フィルタは、統計的性質に比べ比較的容易に求まる各信号の周波数特性に基づいて、各信号を相補的に組み合わせる。KCFS の問題に対し、回転や転がりに対してはリンク上で慣性系に対する速度が最小となる点 (速度最小点, MVP) を用いることで、跳躍に対しては反力に基づいてフィルタ周波数を適応的に変化させることで推定精度を向上させた。しかし、速度推定には KCFS から得られる値を用いており、これが原因となり精度が低下していた。本稿では、より信頼できると考えられる推定位置の微分を速度推定器にフィードバックすることで精度を向上させる方法を提案する。

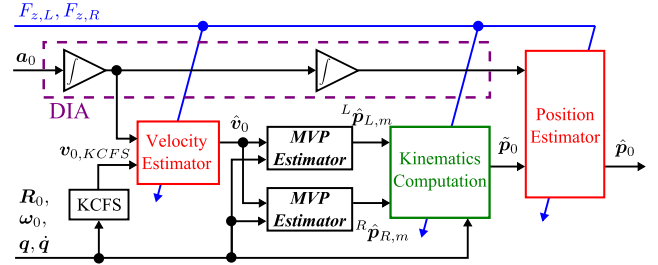
2. MVP を用いたデッドレコニング [7][8]

2.1 デッドレコニングの概要

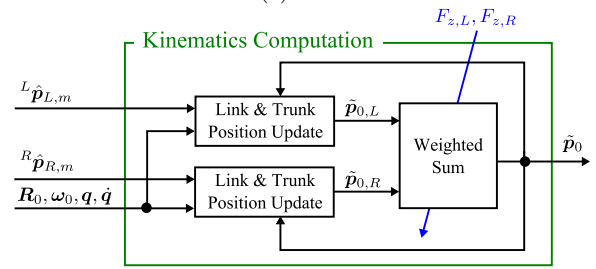
図 1(a) に示すように、筆者らのこれまでの方法の流れは次のようになる。

1. 体幹速度推定
2. 速度情報に基づく MVP 推定
3. MVP を用いた体幹位置の運動学計算
4. 運動学計算と DIA による位置推定

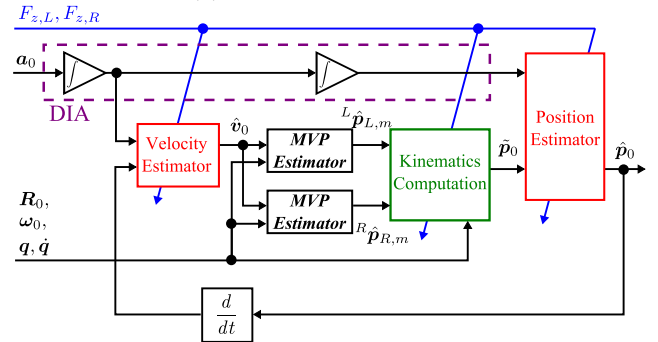
この方法は速度推定器と位置推定器に相補フィルタを用いた二段階相補フィルタであり、接地状態の変化に伴



(a) 従来方法



(b) 運動学計算部分の詳細



(c) 提案する速度フィードバックを含むデッドレコニング

図 1 速度最小点を用いたデッドレコニング

う各信号の信頼性の変化に対応するために、それぞれの交差周波数は反力に基づいて適応的に変化する (図 1(a) の青矢印)。反力はまた、各足の MVP から求まる体幹位置から運動学計算の値を求めるときに用いられる。

2.2 体幹速度推定

以下、サンプリング間隔 ΔT として離散時間で表現し、時刻 $(k-1)\Delta T$ の変数 $*$ の値を $*[k-1]$ のように表す。ただし、見易さのために、時刻 k の場合は $*$ と表すとす。また、 $\mathbf{1} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は単位行列、 $\mathbf{0} \in \mathbb{R}^3$ は零ベクトルを表す。

体幹速度は次のように推定される。

$$\hat{v}_0 = \mathbf{H}_{v1}(z)\mathbf{a}_0 + \mathbf{H}_{v2}(z)v_{0,KCFS} \quad (1)$$

ただし、 \mathbf{a}_0 は加速度センサから得られる体幹加速度、

$\mathbf{v}_{0,KCFS}$ は KCFS による体幹速度を表す。 $\mathbf{H}_{v1}(z)$, $\mathbf{H}_{v2}(z)$ は交差周波数 f_v である次の周波数フィルタを双一次変換したものである。

$$\frac{1}{s} \mathbf{F}_{v1}(s) = \frac{1}{s} \frac{(1/2\pi f_v)s}{s + (1/2\pi f_v)s} \mathbf{1} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_{v2}(s) = \mathbf{1} - \mathbf{F}_{v1}(s) = \frac{1}{1 + (1/2\pi f_v)s} \mathbf{1} \quad (3)$$

2.3 速度情報に基づく MVP 推定

例えば、支持足が左足である状況を考えよう。左足座標系 Σ_L と体幹座標系 Σ_0 の運動学は次式で表される。

$$\mathbf{p}_L = \mathbf{p}_0 + \mathbf{R}_0^0 \mathbf{p}_L \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_L = \mathbf{v}_0 + [\boldsymbol{\omega}_0 \times] \mathbf{R}_0^0 \mathbf{p}_L + \mathbf{R}_0^0 \mathbf{v}_L \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_L = \mathbf{R}_0^0 \mathbf{R}_L \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\omega}_L = \boldsymbol{\omega}_0 + \mathbf{R}_0^0 \boldsymbol{\omega}_L \quad (7)$$

ただし、 ${}^*1\mathbf{p}_{*2}$, ${}^*1\mathbf{v}_{*2}$, ${}^*1\mathbf{R}_{*2}$, ${}^*1\boldsymbol{\omega}_{*2}$ はそれぞれ座標系 Σ_{*2} の座標系 Σ_{*1} に対する位置、速度、姿勢、角速度であり、左肩に添字がないものは慣性系 Σ に対する量を表す。体幹姿勢と体幹角速度は、筆者ら [9] の過去の研究により推定できる。 0_*L は、エンコーダにより計測される関節変位およびその微分により計算できる。

式 (4), (5) と同様に、左足リンク上のある点の位置、速度は次式で表される。

$$\mathbf{p}_{L,m} = \mathbf{p}_L + \mathbf{R}_L^L \mathbf{p}_{L,m} \quad (8)$$

$$\mathbf{v}_{L,m} = \mathbf{v}_L + [\boldsymbol{\omega}_L \times] \mathbf{R}_L^L \mathbf{p}_{L,m} + \mathbf{R}_L^L \mathbf{v}_{L,m} \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{p}_{L,m}$, $\mathbf{v}_{L,m}$ はそれぞれ左足リンク上のある点の Σ に対する位置と速度である。同様に、 ${}^L\mathbf{p}_{L,m}$, ${}^L\mathbf{v}_{L,m}$ はそれぞれ左足リンク上のある点の Σ_L に対する位置と速度である。仮に、 $\mathbf{v}_{L,m} = \mathbf{0}$ を満たす点 (MVP) の左足に対する位置 ${}^L\mathbf{p}_{L,m}$ を推定できれば、その点を經由することで左足の位置を更新できる。 ${}^L\mathbf{v}_{L,m} \simeq \mathbf{0}$ と仮定すると、式 (9) は次のように書き直される。

$$\mathbf{v}_{L,m} \simeq \mathbf{v}_L + [\boldsymbol{\omega}_L \times] \mathbf{R}_L^L \mathbf{p}_{L,m} \quad (10)$$

$\hat{\mathbf{v}}_0$ と式 (5) の運動学から \mathbf{v}_L の推定値 $\hat{\mathbf{v}}_L$ が得られるとして、式 (10) を最小化することはひとつの方法であるが、 $\boldsymbol{\omega}_L \rightarrow \mathbf{0}$ のとき解は一意に定まらない。そこで、左足に対する位置 ${}^L\mathbf{p}_{L,m}$ の時間変化も評価関数に加えることで計算を可能とする。すなわち、MVP は次の評価関数を最小化するものとして計算される。

$$E = \frac{1}{2} \|\hat{\mathbf{v}}_L + [\boldsymbol{\omega}_L \times] \mathbf{R}_L^L \mathbf{p}_{L,m}\|^2 + \frac{1}{T_m^2} \frac{1}{2} \|\mathbf{p}_{L,m} - \mathbf{p}_{L,m}[k-1]\|^2 \quad (11)$$

T_m は重みとして働くパラメータである。停留条件 $\left(\frac{\partial E}{\partial \mathbf{p}_{L,m}}\right)^T = \mathbf{0}$ より、 ${}^L\mathbf{p}_{L,m}$ は次のように求まる。

$${}^L\mathbf{p}_{L,m} = \mathbf{C}_{1,L} \mathbf{R}_L^T \hat{\mathbf{v}}_L + \mathbf{C}_{2,L} \mathbf{p}_{L,m}[k-1] \quad (12)$$

$$\mathbf{C}_{1,L} = \frac{T_m^2}{1 + \|\boldsymbol{\omega}_L\|^2 T_m^2} [(\mathbf{R}_L^T \boldsymbol{\omega}_L) \times]$$

$$\mathbf{C}_{2,L} = \frac{T_m^2}{1 + \|\boldsymbol{\omega}_L\|^2 T_m^2} \left(\mathbf{R}_L^T \boldsymbol{\omega}_L \boldsymbol{\omega}_L^T \mathbf{R}_L + \frac{1}{T_m^2} \mathbf{1} \right)$$

支持足が右足の場合も、同様にして ${}^R\hat{\mathbf{p}}_{R,m}$ が求まる。

2.4 MVP を用いた体幹位置の運動学計算

この節では、図 1(b) に示した運動学計算について述べる。MVP を用いて、左足の位置を次式で更新する。

$$\tilde{\mathbf{p}}_L = \hat{\mathbf{p}}_L[k-1] - \mathbf{R}_L^L \hat{\mathbf{p}}_{L,m} + \mathbf{R}_L^L \mathbf{p}_{L,m} \quad (13)$$

さらに、式 (4) を用いて、左足から求まる体幹位置 $\tilde{\mathbf{p}}_{0,L}$ が計算できる。同様にして、 $\tilde{\mathbf{p}}_R$, $\tilde{\mathbf{p}}_{0,R}$ が求まる。

いま、得られた $\tilde{\mathbf{p}}_{0,L}$, $\tilde{\mathbf{p}}_{0,R}$ からよりよい推定値を求めるために、次のような加重平均を考える。

$$\tilde{\mathbf{p}}_0 = w_L \tilde{\mathbf{p}}_{0,L} + w_R \tilde{\mathbf{p}}_{0,R} \quad (14)$$

ここで、支持足側にある MVP のほうが速度が零である可能性が高いと考え、次のように重み w_* を決定する。

$$w_* = \frac{\hat{F}_{z,*} + \epsilon_F}{\hat{F}_{z,L} + \hat{F}_{z,R} + 2\epsilon_F}, \quad (* = L, R) \quad (15)$$

$$\hat{F}_{z,*} = \begin{cases} 0 & (F_{z,*} < 0) \\ F_{z,*} & (0 \leq F_{z,*} \leq Mg) \\ Mg & (Mg < F_{z,*}) \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 M はロボットの質量、 g は重力加速度であり、 $F_{z,*}$ は各足の反力の鉛直方向成分である。また、 ϵ_F は分母を非零とするためのパラメータである。

各足位置の誤差を修正するために、得られた $\tilde{\mathbf{p}}_0$ を用いて $\hat{\mathbf{p}}_*$ が計算される。

$$\hat{\mathbf{p}}_* = \tilde{\mathbf{p}}_* + (\tilde{\mathbf{p}}_0 - \tilde{\mathbf{p}}_{0,*}), \quad (* = L, R) \quad (17)$$

2.5 運動学計算と DIA による位置推定

体幹位置は、運動学計算の値と加速度を組み合わせることで推定される。

$$\hat{\mathbf{p}}_0 = \mathbf{H}_{p1}(z) \mathbf{a}_0 + \mathbf{H}_{p2}(z) \tilde{\mathbf{p}}_0 \quad (18)$$

ただし、 $\mathbf{H}_{p1}(z)$, $\mathbf{H}_{p2}(z)$ は次の周波数フィルタを双一次変換したものである。

$$\frac{1}{s^2} \mathbf{F}_{p1}(s) = \frac{1}{s^2} \frac{(1/2\pi f_p)^2 s^2}{(1 + (1/2\pi f_p)s)^2} \mathbf{1} \quad (19)$$

$$\mathbf{F}_{p2}(s) = \mathbf{1} - \mathbf{F}_{p1}(s) = \frac{1 + (1/\pi f_p)s}{(1 + (1/2\pi f_p)s)^2} \mathbf{1} \quad (20)$$

2.6 反力情報を用いた交差周波数の決定

二脚ロボットの運動において、足が接地していれば運動学計算が、離れていれば加速度が相対的に信頼できると考えられる。この信頼性の変化に対応するために、接地状態と関連すると考えられる反力を用いて、フィルタの交差周波数 f を適応的に決定する。

$$f = \begin{cases} f_{\min} & (F_z < 0) \\ \hat{f}(F_z) & (0 \leq F_z \leq Mg) \\ f_{\max} & (Mg < F_z) \end{cases} \quad (21)$$

F_z は反力の鉛直方向成分である。 $\hat{f}(F_z)$ は次の条件を満たす単調増加関数であり、ここでは一次関数とした。

$$\hat{f}(0) = f_{\min}, \quad \hat{f}(Mg) = f_{\max} \quad (22)$$

これより、式 (1) の f_v と式 (18) の f_p は設計される。

3. 速度フィードバックを含む

速度最小点を用いたデッドレコニング

これまでの方法 [7][8] では、速度推定において KCFS による体幹速度 $\mathbf{v}_{0,KCFS}$ を低周波数成分の推定値として用いて、推定を行ってきた。この速度は、支持足が地面上に固定されていることを前提として計算される。一方で、位置推定において、支持足は回転や転がりをするものとして MVP を用いた運動学計算を利用している。このように、位置推定と速度推定において前提が整合していないため、 $\mathbf{v}_{0,KCFS}$ を利用することが精度低下の一因となっていると考えられる。そこで、本稿では、KCFS による体幹速度よりもより精度と整合性が高いと考えられる推定位置の微分を速度推定器にフィードバックすることで、デッドレコニング全体の精度を向上させる方法を提案する。すなわち、式 (1) を、次式のように変更する。

$$\hat{\mathbf{v}}_0 = \mathbf{H}'_{v1}(z)\mathbf{a}_0 + \mathbf{H}'_{v2}(z)\hat{\mathbf{p}}_0 \quad (23)$$

ただし、 $\mathbf{H}'_{v1}(z)$ 、 $\mathbf{H}'_{v2}(z)$ は次の周波数フィルタを双一次変換したものである。

$$\frac{1}{s}\mathbf{F}_{v1}(s) = \frac{1}{s} \frac{(1/2\pi f_v)s}{s + (1/2\pi f_v)s} \mathbf{1} \quad (24)$$

$$s\mathbf{F}_{v2}(s) = s(\mathbf{1} - \mathbf{F}_{v1}(s)) = \frac{s}{1 + (1/2\pi f_v)s} \mathbf{1} \quad (25)$$

f_v はこれまでの方法と同様に式 (21) を用いて適応的に設計される。

提案するデッドレコニングの概要を図 1(c) に示す。MVP 推定、体幹位置の運動学計算、位置推定器はこれまでのものと同じである。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

動力学シミュレータとして、OpenHRP3[10] を用いた。また、使用したロボットモデルを図 2 に示す。2 歩前進動作のために、PD 制御器を用いて Yamamoto らの方法 [11] で計算した目標関節変位に各関節変位を追随させた。床とロボットの間の静止摩擦係数と動摩擦係数はともに 1.0 とした。シミュレーションの様子を図 3 に示す。ここで、次のものを比較した。

- KCFS
- ハイパスフィルタに通した DIA(DIA+HPF)
- KCFS と DIA による相補フィルタ (KCFS+DIA)
- KCFS による速度を用いた提案方法 (Previous)
- 提案方法 (PDR)

$f_{v,\max}$ 、 $f_{v,\min}$ 、 $f_{p,\max}$ 、 $f_{p,\min}$ はそれぞれ 0.1[Hz]、0.005[Hz]、5[Hz]、0.005[Hz] とし、 $T_m = 1$ 、 $\epsilon_F = 0.1$ とした。KCFS+DIA のフィルタは提案した位置推定器と同じものである。DIA+HPF には $\mathbf{F}_{p1}(s)$ と同じフィルタを用いた。ただし、遮断周波数は 0.001[Hz] とした。

体幹加速度の測定誤差として、次のような正規分布に従う誤差 \mathbf{e}_a を真値に加えた。

$$\mathbf{e}_a \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_a, \text{diag}\{0.1^2, 0.1^2, 0.1^2\}) \quad (26)$$

$$\boldsymbol{\mu}_a \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \text{diag}\{0.04^2, 0.04^2, 0.04^2\}) \quad (27)$$

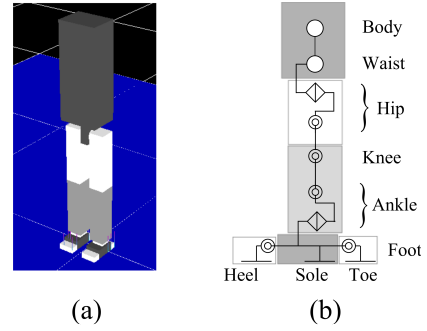


図 2 ロボットモデル (a) 外観. (b) 構造.

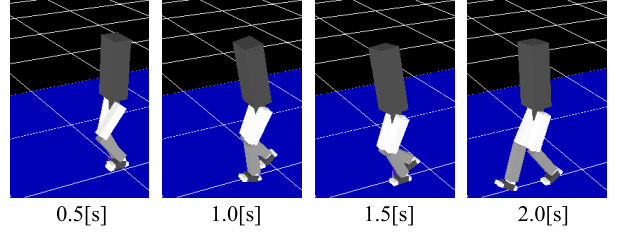


図 3 シミュレーションの様子

表 1 位置推定の二乗平均誤差

Method	x	y	z	total
KCFS	26.77	4.202	30.73	61.71
DIA+HPF	20.14	25.27	36.55	81.97
KCFS+DIA	23.68	4.960	33.99	62.63
Previous	23.73	7.710	28.18	59.62
PDR	8.953	5.049	14.14	28.14

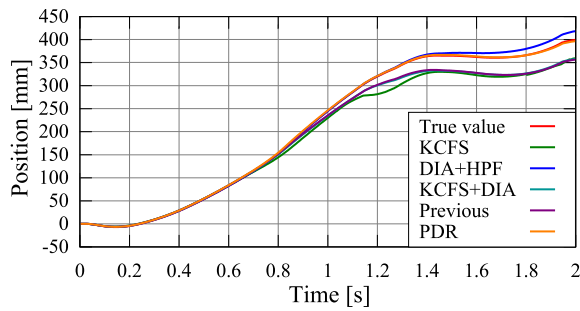
表 2 速度推定の二乗平均誤差

Method	x	y	z	total
KCFS	75.67	33.80	101.4	210.8
DIA+HPF	28.66	33.06	51.55	113.3
KCFS+DIA	33.01	16.93	58.61	108.5
Previous	50.73	27.38	78.63	156.7
PDR	14.76	8.735	29.00	52.50

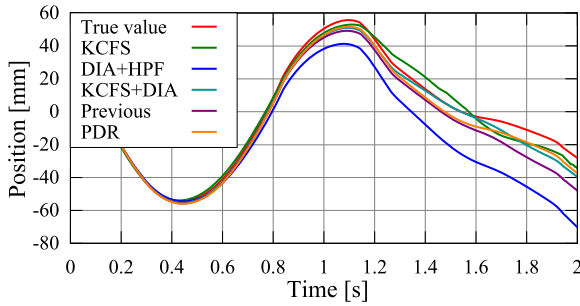
ただし、 $\mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ は平均 $\boldsymbol{\mu}$ 、共分散 $\boldsymbol{\Sigma}$ の正規分布とし、 $\text{diag}\{*\}$ は対角行列とする。

4.2 シミュレーション結果

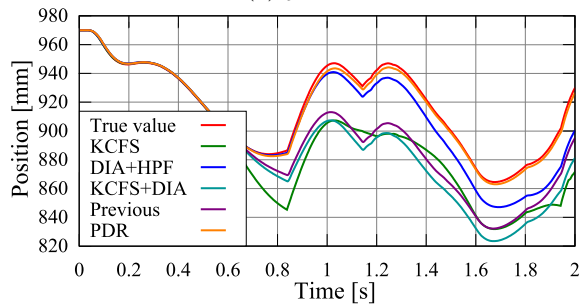
位置推定、速度推定の二乗平均誤差を表 1 と表 2 にそれぞれ示す。また、それぞれの結果の一例を図 4 と図 5 に示す。結果から、KCFS は位置推定で比較的良好な精度だが、速度推定において回転や転がりのために誤差が大きい。一方で、DIA+HPF は位置推定で誤差が大きい、速度推定で良好な精度が得られている。これは、積分に伴う誤差の累積量が積分の回数により変化するためだと考えられる。KCFS+DIA はそれぞれの良好な結果に近い値が得られている。また、Previous は位置推定では比較的良好な精度であるが、KCFS の影響により速度推定の誤差が大きい。これらに対して、提案方法は位置、速度の両推定で良好な精度が得られている。特に、他の方法に比べ、小さくとも 50[%] 程度の誤差を低減していることが確認できる。



(a) x 方向

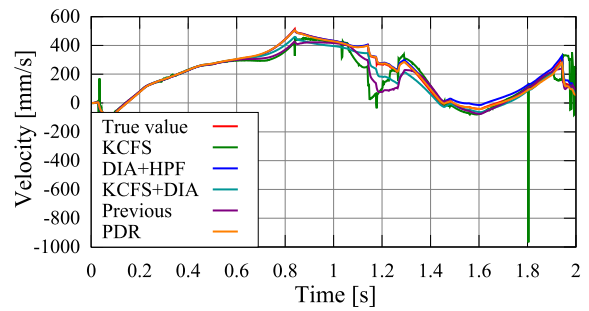


(b) y 方向

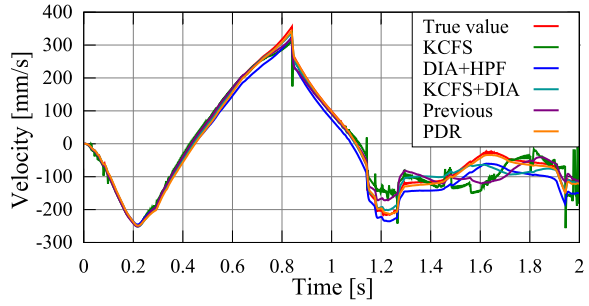


(c) z 方向

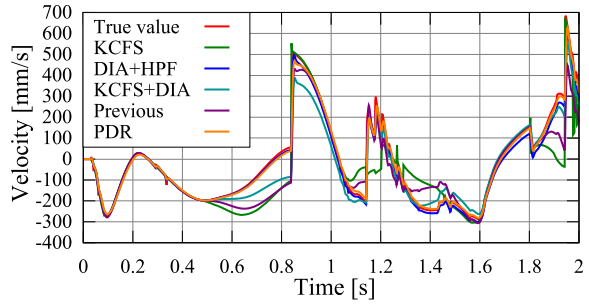
図 4 位置推定結果の一例



(a) x 方向



(b) y 方向



(c) z 方向

図 5 速度推定結果の一例

5. おわりに

本稿では、二脚ロボットの高精度なデッドレコニングのために、速度フィードバックによる速度最小点を用いたデッドレコニングを提案した。提案方法は、MVP を経由する運動学計算と加速度センサ情報を、反力情報に基づいた二段階相補フィルタにより組み合わせる。速度推定器において、精度低下の一因となっていた KCFS による速度に代わり、推定位置の微分を用いることで精度を向上させた。シミュレーション結果から、位置と速度の推定において誤差の低減が確認できた。

参考文献

- [1] S. Thompson, et al.: "Humanoid Robot Localisation using Stereo Vision", Proc. of the 2005 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, pp.19-25, 2005.
- [2] A. Hornung, et al.: "Humanoid Robot Localization in Complex Indoor Environments", Proc. of the 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1690-1695, 2010.
- [3] 西脇ら: "ヒューマノイドによる未知不整地のレーザー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.
- [4] 増田ら: "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, 2A1-73-105, 2000.

- [5] M. Bloesch, et al.: "State Estimation for Legged Robots - Consistent Fusion of Leg Kinematics and IMU", Proc. of Robotics: Science and Systems, 2012.
- [6] A. Chilian, et al.: "Multisensor Data Fusion for Robust Pose Estimation of a Six-Legged Walking Robot", Proc. of the 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2497-2504, 2011.
- [7] 舩屋ら: "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", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 予稿集, 2P1-A09, 2013.5.
- [8] 舩屋ら: "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] 杉原ら: "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, no.3, pp.251-262, 2013.
- [10] S. Nakaoka, et al.: "Constraint-based dynamics simulator for humanoid robots with shock absorbing mechanisms", Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3641-3647, 2007.
- [11] K. Yamamoto, et al.: "Gait Planning including Toe Contact with Boundary Condition Relaxation", Proc. of the 17th CISM-IFTOMM Symposium, pp.409-416, 2008.