

瞬間速度最小点を用いた二脚ロボットのオドメトリ

○舂屋賢 (阪大) 杉原知道 (阪大)

1. はじめに

移動ロボットの制御において、現在位置の高精度推定は重要である。車輪移動ロボットでは駆動輪のエンコーダ情報を用いたデッドレコニング [1] が行われている。また、その応用としてデッドレコニングとカメラ情報を用いた推定 [2] や DGPS との融合による推定 [3] が提案されている。これら車輪移動ロボットの位置推定に対し、二脚ロボットの位置推定はまだ不十分といえる。

二脚ロボットにおいて、カメラを用いた推定 [4] やレーザ距離センサを用いた推定 [5] が行われている。これらは長時間の推定には適しているが、その計測周期は制御周期と比べて遅い。このため、制御のために短周期でフィードバックできるような位置推定が求められる。短周期で計測できるセンサとして加速度センサがあるが、位置を得るための2階積分に伴う誤差の累積が問題となる。一方、脚ロボットのデッドレコニング [6][7] では支持脚固定とした運動学計算がなされてきた。しかし、実環境での運動において、滑りなどにより支持脚は慣性系に対して変動する。また、ジャンプのような全ての足が接地しない動作では推定精度が必然的に劣化する。

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する。上記の問題に対し、足先の運動に対して最も変動が小さいと考えられる瞬間速度最小点に着目する。加速度センサの2階積分に伴う誤差の累積はハイパスフィルタ (HPF) により低減できる。そこで、瞬間速度最小点より求めた体幹位置を前述のHPFと相補的になるような周波数フィルタに通し、それらの信号を組み合わせることで推定精度の向上を図る。人型ロボットを用いたシミュレーションにより、提案方法の有効性を確認する。

2. 瞬間速度最小点を用いた体幹位置推定

2.1 体幹位置の低周波数における推定値

以下、時間間隔 ΔT とし、 $*[k]$ を時刻 $k\Delta T$ における $*$ の値とする。また、瞬間速度最小点のような各時刻で独立に求まる値の時間変化を表すために、時刻 $k\Delta T$ で求めた $*$ の時刻 $(k+1)\Delta T$ における値を $*[k; k+1]$ と定義する。ここで、初期の体幹の位置 $\mathbf{p}_B[0]$ 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 $\mathbf{p}_{i,\theta}[0;0]$ と速度 $\mathbf{v}_{i,\theta}[0;0]$ 、リンク i に対する瞬間速度最小点の位置 ${}^i\mathbf{p}_{i,\theta}[0;0]$ は既知であるとする。また、体幹の姿勢 $\mathbf{R}_B[k]$ 、角速度 $\boldsymbol{\omega}_B[k]$ は姿勢推定 [8] により求まり、関節角 $\mathbf{q}[k]$ はエンコーダで計測される。

リンク i に対する瞬間速度最小点の速度 ${}^i\mathbf{v}_{i,\theta}[k; k]$ について次の仮定をおく。

$${}^i\mathbf{v}_{i,\theta}[k; k] = \mathbf{0} \quad (1)$$

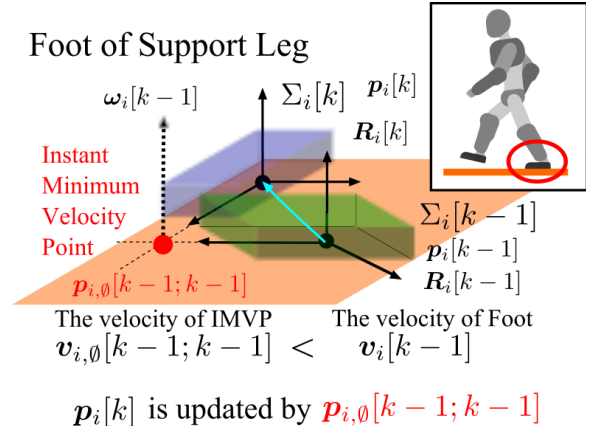


図1 瞬間速度最小点経路によるリンク位置の更新

式 (1) の仮定に基づいて、瞬間速度最小点から運動学によりリンク i の位置 $\mathbf{p}_i[k]$ を計算すると、

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

となる。ここで、 $\mathbf{R}_i[k]$ は運動学より求まる。 $\mathbf{p}_{i,\theta}[k; k]$ 、 ${}^i\mathbf{p}_{i,\theta}[k; k]$ の計算は次節で述べる。リンク i の位置からの体幹位置 $\mathbf{p}_{B,i}[k]$ は

$$\mathbf{p}_{B,i}[k] = \mathbf{p}_i[k] + \mathbf{R}_B[k] {}^B\mathbf{p}_i[k] \quad (3)$$

で計算される。 ${}^B\mathbf{p}_i[k]$ は体幹に対するリンク i の位置である。本研究では、左足からの体幹位置 $\mathbf{p}_{B,L}[k]$ と右足からの体幹位置 $\mathbf{p}_{B,R}[k]$ の2つの平均を用いる。

$$\mathbf{p}_B[k] = \frac{1}{2} (\mathbf{p}_{B,L}[k] + \mathbf{p}_{B,R}[k]) \quad (4)$$

2.2 瞬間速度最小点の計算方法

式 (1) より、瞬間速度最小点は次式を満たす。

$$\mathbf{v}_{i,\theta}[k; k] = \mathbf{v}_i[k] + \boldsymbol{\omega}_i[k] \times \mathbf{R}_i[k] {}^i\mathbf{p}_{i,\theta}[k; k] \quad (5)$$

$\mathbf{v}_i[k]$ 、 $\boldsymbol{\omega}_i[k]$ は慣性系に対するリンク i の速度と角速度であり、 $\mathbf{q}[k]$ および $\mathbf{v}_B[k]$ 、 $\boldsymbol{\omega}_B[k]$ から運動学により求まる。本研究では、支持脚固定とした運動学計算による体幹位置 ${}^1\mathbf{p}_B[k]$ の差分を $\mathbf{v}_B[k]$ とした。

$$\mathbf{v}_B[k] = \frac{1}{\Delta T} ({}^1\mathbf{p}_B[k] - {}^1\mathbf{p}_B[k-1]) \quad (6)$$

ただし、支持脚は力センサにより計測される反力の鉛直方向成分が大きい側の脚とした。

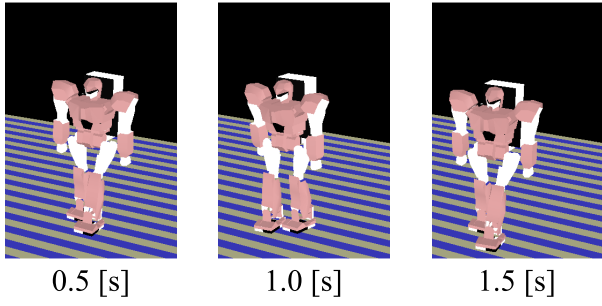


図2 巡回歩行シミュレーションの様子

式 (5) の $\mathbf{v}_{i,0}[k; k]$ を最小とするような ${}^i\mathbf{p}_{i,0}[k; k]$ は直線得られる．ここでは，距離最小となるように次式で計算した．

$${}^i\mathbf{p}_{i,0}[k; k] = \begin{cases} \mathbf{R}_i^T[k] \frac{\boldsymbol{\omega}_i[k] \times \mathbf{v}_i[k]}{\|\boldsymbol{\omega}_i[k]\|^2} & (\|\boldsymbol{\omega}_i[k]\|^2 \geq \epsilon^2) \\ \mathbf{0} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (7)$$

ここで， ϵ は計算上の閾値である．また，そのときの速度 $\mathbf{v}_{i,0}[k; k]$ は次式で計算される．

$$\mathbf{v}_{i,0}[k; k] = \begin{cases} \frac{\boldsymbol{\omega}_i[k]^T \mathbf{v}_i[k]}{\|\boldsymbol{\omega}_i[k]\|^2} \boldsymbol{\omega}_i[k] & (\|\boldsymbol{\omega}_i[k]\|^2 \geq \epsilon^2) \\ \mathbf{0} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (8)$$

また，慣性系に対する瞬間速度最小点を次式で計算する．

$$\mathbf{p}_{i,0}[k; k] = \mathbf{p}_i[k] + \mathbf{R}_i[k] {}^i\mathbf{p}_{i,0}[k; k] \quad (9)$$

図1はリンク位置の更新についての概要である．

2.3 体幹位置の高周波数成分

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，高周波数成分として用いる．

$$\mathbf{a}_{B,\text{mes}}[k] = \mathbf{R}_B[k] {}^B\mathbf{a}_{B,\text{mes}}[k] - \mathbf{g} \quad (10)$$

ここで， \mathbf{g} は重力加速度である．

2.4 体幹位置推定のための相補フィルタ

最終的に，推定値 $\mathbf{p}_{B,\text{est}}[k]$ は次式により計算される．

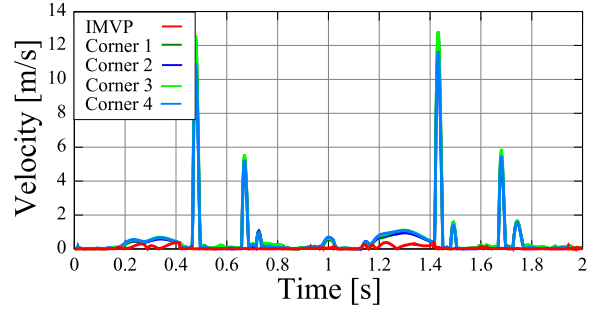
$$\mathbf{p}_{B,\text{est}}[k] = \mathbf{H}_1(s) \frac{1}{s^2} \mathbf{a}_{B,\text{mes}}[k] + \mathbf{H}_2(s) \mathbf{p}_B[k] \quad (11)$$

加速度側の $1/s^2$ を相殺するために次のように相補フィルタを設計した．

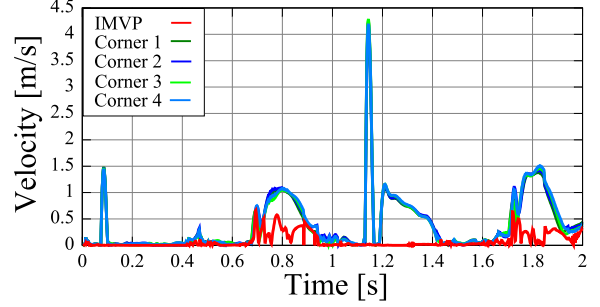
$$\mathbf{H}_1(s) = \frac{T_f^2 s^2}{1 + 2T_f s + T_f^2 s^2} \mathbf{1}_3 \quad (12)$$

$$\mathbf{H}_2(s) = \mathbf{1}_3 - \mathbf{H}_1(s) = \frac{1 + 2T_f s}{1 + 2T_f s + T_f^2 s^2} \mathbf{1}_3 \quad (13)$$

$$T_f = \frac{1}{2\pi f} \quad (14)$$



(a) 左足



(b) 右足

図3 各足の瞬間速度最小点 (IMVP) における速度

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション環境

人型ロボットのモデルとして UT- μ [9] を使い，OpenHRP 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に関する条件の変化を再現するために，摩擦係数を 0.1, 0.5 とした路面を縞状に配置した．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 [10] により計算したものを用いた．

3.2 瞬間速度最小点における速度に関する評価

各足の瞬間速度最小点における速度が，各足の速度より小さいことを確認する．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うように歩行を行わせた結果を検証用データとして用いる．また，姿勢誤差およびセンサ誤差は無視している．図2は巡回歩行シミュレーションの様子である．

右足における結果を図3(a)に，左足における結果を図3(b)に示す．ここで，足の速度として足裏の四隅における速度を用い，そのノルムを比較した．結果から計算した瞬間速度最小点の速度は足の速度よりも小さいことが確認できた．

3.3 巡回歩行に対する推定結果

前節の動作に対する推定結果の二乗平均誤差を表1に示す．ここで，姿勢誤差の影響は無視し，加速度センサのオフセットのみを考えた．オフセットは正規分布に従ってランダムに生成した．代表的なオフセットとして，(1) $[0.026 \ -0.0080 \ 0.029]^T$ ，(2) $[0.011 \ -0.038 \ 0.027]^T$ ，(2) $[-0.028 \ -0.0054 \ 0.016]^T$ についての結果を載せている．また，オフセット (1) の場合における時間変化の

表 1 旋回歩行に対するオフセットがある場合の推定値の二乗平均誤差 [mm]

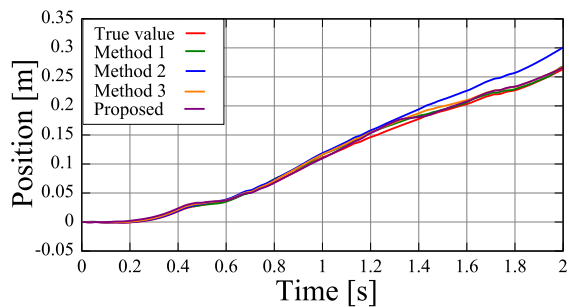
Data	Method	x	y	z	total
	Method 1	3.895	12.90	1.997	18.77
Offset (1)	Method 2	16.09	6.069	28.38	50.51
	Method 3	5.476	12.46	4.121	22.06
	Proposed	4.444	8.878	23.42	36.74
Offset (2)	Method 2	3.783	33.31	26.39	63.49
	Method 3	4.507	10.43	3.942	18.87
	Proposed	3.764	7.153	23.28	34.20
Offset (3)	Method 2	31.71	5.891	15.43	53.02
	Method 3	2.011	12.37	3.040	17.42
	Proposed	3.087	8.755	22.53	34.37

表 2 ジャンプ動作に対するオフセットがある場合の推定値の二乗平均誤差 [mm]

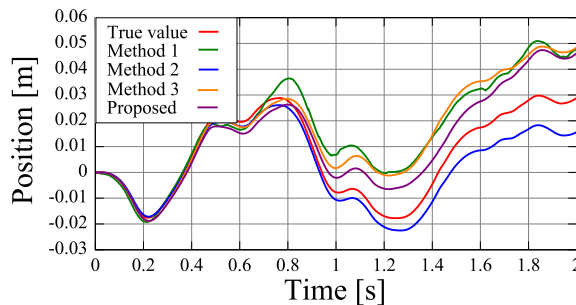
Data	Method	x	y	z	total
	Method 1	21.19	0.9443	1.585	23.72
Offset (1)	Method 2	22.75	7.181	26.10	56.04
	Method 3	19.09	1.016	1.826	21.94
	Proposed	2.129	0.9254	13.12	16.18
Offset (2)	Method 2	9.047	33.98	24.44	67.47
	Method 3	20.04	2.931	1.703	24.67
	Proposed	1.086	2.817	13.21	17.11
Offset (3)	Method 2	25.70	4.695	16.60	46.99
	Method 3	22.49	0.9437	1.143	24.57
	Proposed	2.282	0.8720	13.68	16.83

結果を図 4 に示す. 比較のために, 支持脚固定とした運動学計算 (方法 1), 2 次 HPF を通した加速度の 2 階積分 (方法 2), 提案方法の低周波成分を方法 1 の結果に置き換えた相補フィルタ (方法 3) の結果も示す. ここで提案方法の遮断周波数は $f = 0.5[\text{Hz}]$ とし, 方法 2 の HPF は遮断周波数 $0,001[\text{Hz}]$, 方法 3 の各フィルタは提案方法と同じとした.

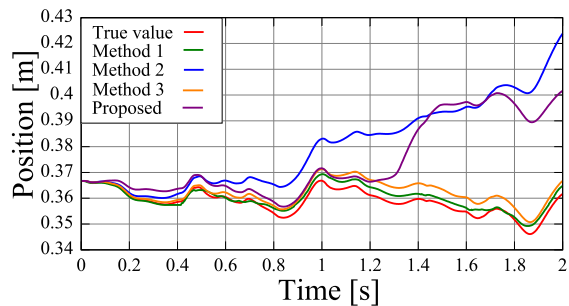
結果から, 方法 1 では平面上であるために z 方向の推定精度はよいことがわかる. しかし, y 方向において $0.8[\text{s}]$ 前後において真値との間に滑りによると考えられる差が生じている. また, 方法 2 では誤差の累積が見られるが, オフセット (1) と (3) の y 方向などオフセットが小さいときは精度はよい. 方法 3 では, 加速度センサの 2 階積分に伴う累積誤差を低減することができているが, 推定精度は方法 1 とあまり差が見られなかった. 提案方法では x と y 方向については比較的良好な推定精度が得られていることがわかる. また, 方法 3 と同様に累積誤差の低減ができていると考えられる. しかし, z 方向における誤差が大きく, 全体の二乗平均誤差の約 $60\sim 70\%$ を占めている. これは, 支持脚が地面に接触している際に z 方向に支持脚は本来



(a) x 方向



(b) y 方向



(c) z 方向

図 4 オフセット 1 の場合における旋回歩行に対する推定結果

変化しないが, その拘束について考慮していないためだと考えられる.

3-4 ジャンプ動作に対する推定結果

人型ロボットを平面上でジャンプさせた場合における推定結果の二乗平均誤差を表 2 に示す. ここで, 屈伸の際の鉛直上向き加速度によりジャンプ動作を実現した. 比較対象, 加速度センサのオフセット, 各方法の遮断周波数は前節に示したものと同一とした. また, オフセット (1) の場合における時間変化の結果を図 6 に示す. 図 5 はジャンプ動作シミュレーションにおけるジャンプ前後の様子である.

結果から, 方法 2 は前節と同様の結果であった. また, 前節と同様に方法 1 では z 方向の推定精度は良好であった. しかし, x 方向の誤差が大きい. これは, 足が浮いている間の x 方向への変位を計測することができないためである. 方法 3 もまた, 方法 1 を低周波成分として用いているために, x 方向の誤差が同様に大きい. これらに対し, 提案方法は x 方向の変位に追

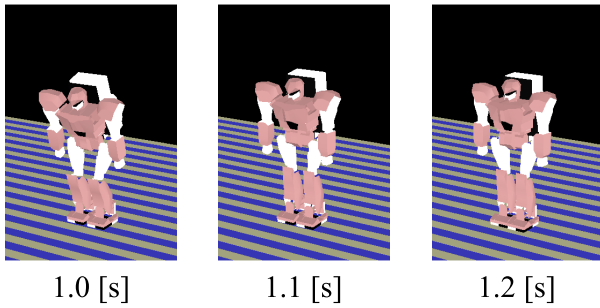


図5 ジャンプ動作シミュレーションの様子

従できていた。しかし、ジャンプ後に z 方向誤差が生じており、全体の二乗平均誤差の約80[%]を z 方向が占めている。これは、前節と同様に支持脚が地面に接触している際の拘束を考慮していないためだと考えられる。

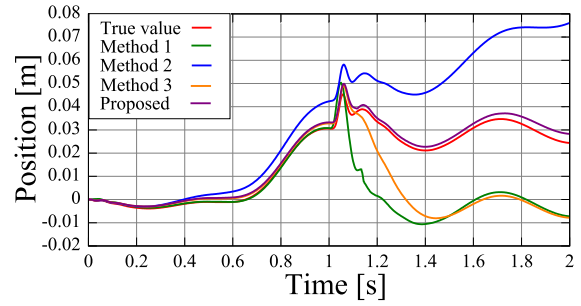
4. おわりに

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。人型ロボットを用いた巡回歩行のシミュレーションから、提案方法は x 、 y 方向に対して良好な推定が行えていた。また、人型ロボットのジャンプに対する推定結果から、提案方法は足が浮くような運動に対してもよい推定が行えていた。 z 方向の推定精度向上が今後の課題である。

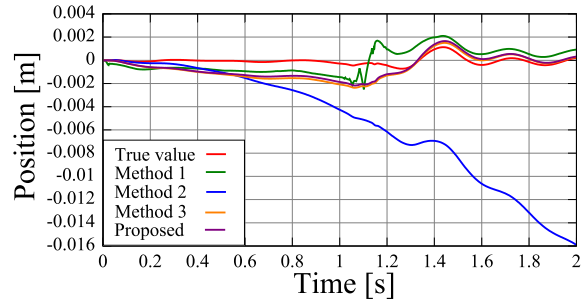
謝辞 本研究は、科学研究費補助金若手研究(A)内課題「力学変容系としての人の運動理解と次世代人型ロボット制御の基盤構築」(課題番号:22680018)の支援を受けた。

参考文献

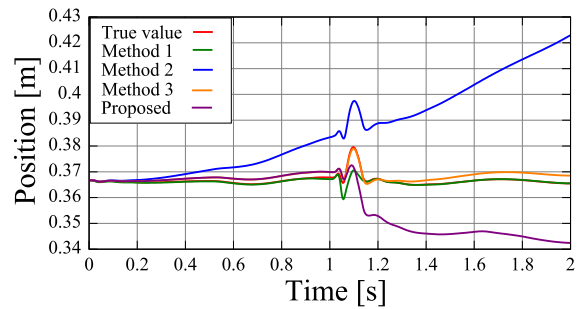
- [1] James L. Crowley: "Asynchronous control of orientation and displacement in a robot vehicle", Proc. of The 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.3, pp.1277-1282, 1989.
- [2] 本村暁, 松岡毅, 長谷川勉, 倉爪亮: "二つのランドマーク方位計測とデッドレコニングに基づく実時間自己位置同定法", 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.3, pp.311-320, 2005.
- [3] 大野和則, 坪内孝司, 重松文治, 前山祥一, 油田信一: "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.
- [4] Simon Thompson and Satoshi Kagami: "Humanoid Robot Localisation using Stereo Vision", Proc. of 2005 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, pp.19-25, 2005.
- [5] 西脇光一, チェスナットジョエル, 加賀美聡: "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, pp.611-617, 2012.
- [6] 増田徹, 前泰志, 新井健生, 井上健司: "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.
- [7] 泉田啓, ワシンプチスラギ, 伏見匡洋, 藤原直史, 菅沼直樹: "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.



(a) x 方向



(b) y 方向



(c) z 方向

図6 オフセット1の場合におけるジャンプ動作に対する推定結果

- [8] Ken Masuya, Tomomichi Sugihara and Motoji 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, pp.606-611, 2012.
- [9] Tomomichi Sugihara, Kou Yamamoto and Yoshihiko Nakamura: "Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots", Robotics and Autonomous System, Vol.56, Issue 1, pp.82-94, 2007.
- [10] 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.