

ユニバーサル性を高めた歩行支援機器の開発 - 制御系設計のための数値実験 -

小笠原健一*・園田増雄*

* 電子部

Development of Assist Device with Universality in Walking Application - Simulation for Controller Design -

Ken-ichi OGASAWARA* and Masuo SONODA*

高齢者の社会活動を促し活力ある社会を保つには高齢者の自立生活支援が欠かせない。自立した生活を営むには既存の住環境との親和性が高い移動手段の確保が必要であるが、既存の移動支援機器は使用者の移動能力を完全に代替してしまうことから運動量不足が懸念される。

本論文では、ユーザの歩行能力を補完して日常生活を営む上で必要かつ十分な移動手段を確保するための歩行支援機器開発のための端緒として、車輪型倒立振子を用いて歩行支援問題をモデル化し、インピーダンス制御を用いた解法を提案する。

シミュレーション結果から、路面傾斜角に対して頑健性を有し、ユーザの運動に対して良好な追従特性を持つ支援機器挙動が提案法を用いて実現できることが確認できた。

1 はじめに

高齢者の社会活動を促し活力ある社会を保つには高齢者の自立生活支援が欠かせない。自立した生活を営むには既存の住環境との親和性が高い移動手段の確保が必要である。電動車椅子・シニアカーといった既存の移動支援機器は、使用者の移動能力を完全に代替してしまうことから運動量不足が懸念される。認知症の発症や生活習慣病の進行といった運動量不足が招く弊害は一般によく知られており、QOL 向上の観点からは歩行能力を補完して日常生活を営む上で必要かつ十分な移動手段を確保することが望ましい。

そこで本論文では、幼児の歩行訓練機器あるいはショッピングカートの類に電動アシスト機能を付加した歩行支援機器開発のための端緒として、車輪型倒立振子を用いて歩行支援問題をモデル化しインピーダンス制御を用いた解法を提案する。そして、提案法の有効性をシミュレーションで検証する。

2 歩行支援問題

2.1 モデル

図1に本論文で扱う歩行支援問題の矢状面内のモデルを示す。前頭面内に関しても同様なモデルを考え、3次元空間における歩行支援問題を2つの2次元モデルの組

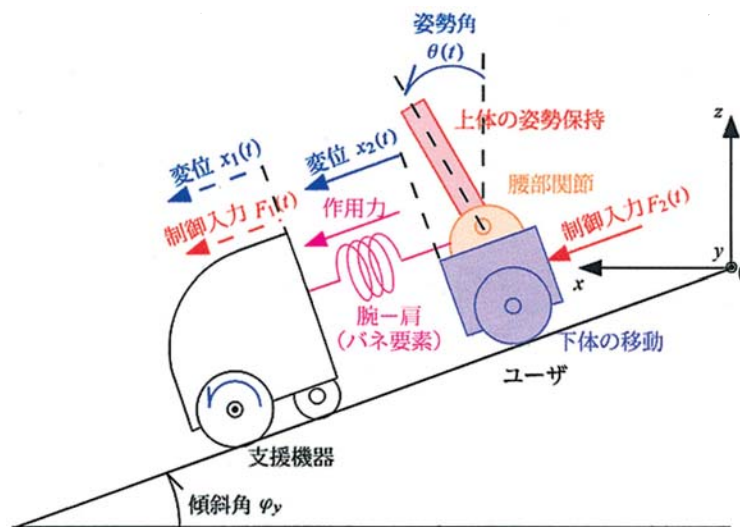


図1 歩行支援問題 (矢状面)

合せて近似する。

簡単化のため以下では矢状面内のモデルに基づいて議論をすすめ、矢状面内のモデルと前頭面内のモデルとで議論が異なる場合はその旨を明示することとする。また、以下では牽引車両と車輪型倒立振子とがバネ要素を介して結合した力学モデルを「歩行支援系」と呼ぶ。

歩行運動を上体の倒れ込み運動と脚の回転運動との同期運動と捉え倒立振子の挙動でモデル化するアプローチは二足歩行運動制御でこれまでも用いられており^{1), 2)}、本論文でもこれを踏襲してユーザの歩行運動特性を車輪型倒立振子の動特性でモデル化する。また、体幹部から肩・腕を通して支援機器に至る連結関係をバネ要素を用いてモデル化する。

2.2 歩行支援問題

歩行支援では機体挙動がユーザにストレスを与えないことが重要である。ストレスの感じ方はユーザ毎に異なるが、パーソナルスペースに頻繁に機体が侵入したり³⁾、常に機体に押し引きされているような場合、大多数のユーザが緊張状態を強いられストレスを感じるものと考えられる。また、歩行支援を必要とする対象者に短い刺激応答時間を求めることは好ましくない。したがって、機体の速応性・減衰性にも注意を払う必要がある。これらの議論を踏まえて、本論文では支援機器の制御目標を以下のように設定する。

(支援機器の制御目標)

1. ユーザと機体との相対距離を一定値に保つ。
以下ではこの値を基準相対距離と呼ぶ。
2. ユーザとの相対速度を零に保つ。
3. 行過ぎ量ができるだけ小さく、かつ遅れ時間ができるだけ短くなるように機体応答の速応性・減衰性を調節する。

3 制御系設計

歩行支援系の制御系設計では以下のような仮定をおく。

(制御系設計における仮定)

1. 支援機器と車輪型倒立振子との相対距離が基準相対距離に等しいとき、車輪型倒立振子から支援機器への作用力は零である。
2. 車輪型倒立振子と支援機器とは状態情報を共有しない。
3. 車輪型倒立振子は振り角を鉛直上方に保つよう制御されている。

3.1 支援機器の制御系設計

3.1.1 インピーダンス制御による機体制御系

本論文ではインピーダンス制御を用いて、ユーザの運動状態に応じた機体の追従特性を実現する。インピーダンス制御とは、効果器の外力に対する機械インピーダンスを、目的とする作業遂行に適するよう設定して位置および力を制御する制御法である⁴⁾。具体的には、図1中のバネ要素と支援機器との間にバネとダンパとを並列結合させたインピーダンス要素の存在を仮定し、これらを適切に設定して機体の位置と加速度を制御して望ましい追従特性を実現する。

支援機器の実質量を M_1 、車輪型倒立振子から支援機器への作用力を $F_1(t)$ 、支援機器への制御入力を $f_1(t)$ とおくと、支援機器の運動方程式は

$$F_1(t) + f_1(t) = M_1 \ddot{x}_1(t) \quad (1)$$

となる。ここで、 $\ddot{x}_1(t)$ は支援機器の重心加速度を表す。

いま、支援機器の外力に対する望ましいインピーダンス応答が

$$F_1(t) = M_1 \ddot{x}_1(t) + D_d \{ \dot{x}_1(t) - \dot{x}_1^d(t) \} + K_d \{ x_1(t) - x_1^d(t) \} \quad (2)$$

と与えられる場合、この応答を実現するための制御入力 $f_1(t)$ は次式のようになる。

$$f_1(t) = D_d \{ \dot{x}_1^d(t) - \dot{x}_1(t) \} + K_d \{ x_1^d(t) - x_1(t) \} \quad (3)$$

上式において、 D_d 、 K_d は理想減衰係数と理想剛性係数、 $\dot{x}_1(t)$ 、 $x_1(t)$ は重心速度と重心位置の実現値、 $\dot{x}_1^d(t)$ 、 $x_1^d(t)$ は重心速度と重心位置の目標値を表す。

2.2の支援機器の制御目標1, 2より重心速度の目標値 $\dot{x}_1^d(t)$ 、重心位置の目標値 $x_1^d(t)$ を、それぞれ、次式のように設定する。

$$x_1^d(t) = x_2(t) + x_{\text{const}} \quad (4)$$

$$\dot{x}_1^d(t) = \dot{x}_2(t) \quad (5)$$

上式において $x_2(t)$ 、 $\dot{x}_2(t)$ 、 x_{const} は、それぞれ、車輪型倒立振子の重心位置、重心速度、基準相対距離を表す。

制御系設計における仮定1より、式(4)は

$$\begin{aligned} x_1^d(t) &= x_2(t) + x_{\text{const}} \\ &= \{x_2(t) + x_{\text{const}} - x_1(t)\} + x_1(t) \\ &= \frac{F_1(t)}{K_{\text{arm}}} + x_1(t) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここで、 K_{arm} は車輪型倒立振子と支援機器とを連結しているバネ要素のバネ定数を表す。

同様に式 (5) は

$$\begin{aligned} \dot{x}_1^d(t) &= \dot{x}_2(t) \\ &= \frac{d}{dt} \{x_2(t) + x_{\text{const}} - x_1(t)\} + \dot{x}_1(t) \\ &= \frac{d}{dt} \frac{F_1(t)}{K_{\text{arm}}} + \dot{x}_1(t) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。

式 (6)、(7) より、支援機器の重心位置目標値と重心速度目標値を式 (4)、(5) のように設定しても制御系設計における仮定 2 を満たすことが分る。

人体の構造から明らかなように、矢状軸方向に比べて水平軸方向は関節可動域が狭く筋力も弱い。そのため、車輪型倒立振子の水平軸方向への牽引車両の運動は、矢状軸方向への運動よりも抑制する方が望ましい。

制御目標 3 および上記の議論より、理想減衰係数 D_d 、理想剛性係数 K_d は矢状面内の運動に関しては式 (2) 右辺の時間応答が臨界制動特性⁵⁾を示すよう設定し、前頭面内の運動に関しては支援機器のインピーダンス応答が過制動特性を示すよう設定する。なお、理想減衰係数 D_d 、理想剛性係数 K_d を一意に定めるには式 (2) 右辺の時間応答の固有角周波数を定めなければならない。ここでは、機体応答が良好な過渡特性を示すよう、実験的にできるだけ大きく設定し⁴⁾、前頭面内のインピーダンス応答設計でも同じ固有角周波数値を用いることとする。

3.1.2 重力補償系の構成

支援機器に作用する力の大きさと方向によってユーザの運動意図が伝達されることから、同じ大きさの作用力に対して同じ挙動を示すことが必要である。ところが、同じ作用力に対する支援機器の挙動が路面傾斜角によって異なることから、その影響を補償しなければならない。

図 1 に示す支援機器部分系の運動方程式は

$$\begin{aligned} F_1(t) + f_1(t) &= M_1 \ddot{x}_1(t) \\ &+ K_{\text{arm}} [x_1(t) - \{x_2(t) + x_{\text{const}}\}] - M_1 g \sin \varphi_y \end{aligned} \quad (8)$$

である。ここで、 φ_y 、 g は、それぞれ、路面傾斜角、重力加速度を表す。

上式から明らかなように、機体挙動に及ぼす路面傾斜角の影響を補償するには支援機器への入力 F_1^{new} を次式のように設定すればよい。

$$F_1^{\text{new}} = F_1(t) + f_1(t) - M_1 g \sin \varphi_y \quad (9)$$

3.2 車輪型倒立振子の制御系設計

本論文では牽引車両のインピーダンス制御系設計の見通しをよくするため 3 次元空間における歩行支援問題を

2 次元モデルの組合わせで近似するアプローチを用いている。このため、シミュレーションで扱うモデルと制御系設計に用いるモデルとの間にモデル化誤差が存在し、車輪型倒立振子の挙動にもその影響が生じる。そこで、外乱オブザーバを用いて車輪型倒立振子の挙動が制御系設計における仮定 3 を満たすようモデル化誤差を補償する⁶⁾。

モデル化誤差に起因する挙動の乱れを外乱 $\omega(t)$ とみなして独立項とすると車輪型倒立振子部分系の運動方程式は、

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} F_2(t) \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} m + M_2 & ml_G \cos \{\varphi_y - \theta(t)\} \\ ml_G \cos \{\varphi_y - \theta(t)\} & I_\theta + ml_G^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} ml_G \dot{\theta}^2(t) \sin \{\varphi_y - \theta(t)\} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \omega(t) \\ 0 \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} -(m + M_2) \sin \varphi_y \\ -ml_G \sin \theta(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

となる。上式において、 m 、 M_2 、 l_G は振子質量、台車質量、振子と台車の接合点から振子重心までの距離を表す。 I_θ 、 $\theta(t)$ 、 $\dot{\theta}(t)$ は振子の重心周りのモーメント、振子角度、振子角速度を表す。 $F_2(t)$ は台車の制御入力を表す。

ここで、外乱推定オブザーバを構成するため次の仮定をおく。

(オブザーバ構成のための仮定)

- 外乱の時間変化に比べてサンプリング時間が十分短く、外乱の動特性を無視できる。

この仮定の下、式 (10) より、状態変数を $[x_2(t), \theta(t), \dot{x}_2(t), \dot{\theta}(t), \omega(t)]^T$ とする状態方程式を導出し、得られた状態方程式よりオブザーバを構成する。

状態方程式の導出では式 (10) を $\theta(t) = 0$ の近傍で 1 次近似線形化するのが一般的であるが、第 2 項、第 3 項の非線形性が強い場合 1 次近似線形化では推定誤差が大きくなるのが予備シミュレーション結果から確認できた。そこで、次式に示す非線形フィードバックを施して非線形性を低減させた後、1 次近似線形化を行う⁷⁾。

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} F_2(t) \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} m + M_2 & ml_G \cos \{\varphi_y - \theta(t)\} \\ ml_G \cos \{\varphi_y - \theta(t)\} & I_\theta + ml_G^2 \end{bmatrix} \\ &\times \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ -ml_G \cos \{\varphi_y - \theta(t)\} \\ I_\theta + ml_G^2 \end{bmatrix} v_1(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ ml_G \sin \theta(t) \\ I_\theta + ml_G^2 \end{bmatrix} \right\} \\ &+ \begin{bmatrix} ml_G \dot{\theta}^2(t) \sin \{\varphi_y - \theta(t)\} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$+ g \begin{bmatrix} -(m + M_2) \sin \varphi_y \\ -ml_G \sin \theta(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで $v_1(t)$ は新たな入力であり、時刻 t における振子の状態 $[\theta(t), \dot{\theta}(t)]^T$ および制御入力 $F_2(t)$ を上式に代入して求めることができる。

式 (11) を式 (10) に代入して整理すると、

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{mgl_G \sin \theta(t)}{I_\theta + ml_G^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-(I_\theta + ml_G^2)}{DEN} \\ \frac{ml_G \cos \{\varphi_y - \theta(t)\}}{DEN} \end{bmatrix} \omega(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{-ml_G \cos \{\varphi_y - \theta(t)\}}{I_\theta + ml_G^2} \end{bmatrix} v_1(t) \quad (12)$$

を得る。上式において、 $DEN = (m + M_2)(I_\theta + ml_G^2) - [ml_G \cos \{\varphi_y - \theta(t)\}]^2$ である。これを $\theta(t) = 0$ の近傍で 1 次近似線形化してまとめると、次式に示す状態方程式が得られる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_2(t) \\ \theta(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-(I_\theta + ml_G^2)}{DEN_0} \\ 0 & \frac{mgl_G}{I_\theta + ml_G^2} & 0 & 0 & \frac{ml_G \cos \varphi_y}{DEN_0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2(t) \\ \theta(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{-ml_G \cos \varphi_y}{I_\theta + ml_G^2} \\ 0 \end{bmatrix} v_1(t) \quad (13)$$

ここで、 $DEN_0 = (m + M_2)(I_\theta + ml_G^2) - (ml_G \cos \varphi_y)^2$ である。

オブザーバ設計で用いる車輪型倒立振子の出力方程式を以下に示す。

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2(t) \\ \theta(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

ここで $y(t)$ は車輪型倒立振子部分系の出力を表す。上式から分かるように、車輪型倒立振子部分系では台車重心位置と振子角度とが計測可能とする。

式 (13), (14) に基づいて同一次元オブザーバを構成し、外乱 $\omega(t)$ の推定値 $\hat{\omega}(t)$ を求める。得られた外乱推定値 $\hat{\omega}(t)$ を用いて台車への制御入力を次のように設定することによって、モデル化誤差の影響を補償することができる。

$$F_2^{new}(t) = F_2(t) + \hat{\omega}(t) \quad (15)$$

歩行支援系の制御系のブロック図を図 2 に示す。

4 シミュレーション

前節で述べた制御系の特性を検証するため、シミュレーションを行った。シミュレーションで用いたパラメータを表 1 に示す。なお、運動方程式簡単化のため、

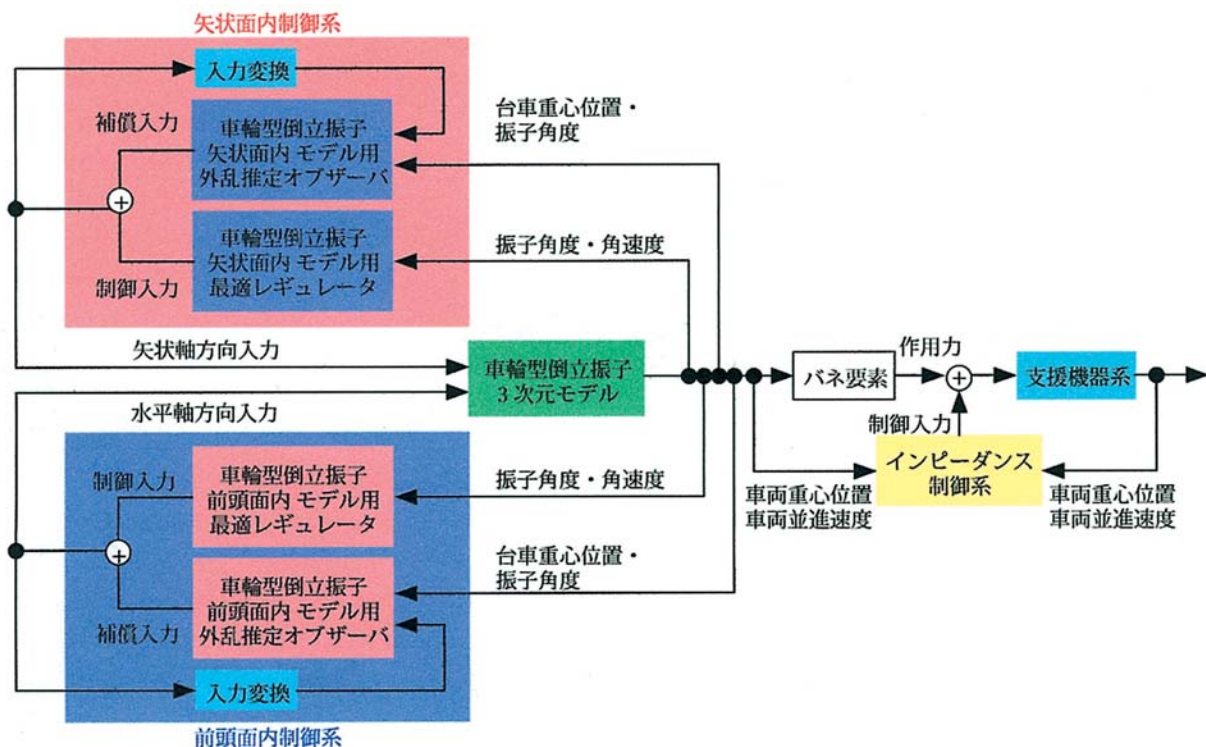


図2 歩行支援系の制御系

表1 シミュレーションパラメータ

支援機器質量 M_1	10 [kg]	車輪型倒立振子台車質量 M_2	10 [kg]
振子質量 m	5 [kg]	振子重心距離 l_G	0.7 [m]
結合バネのバネ定数	1.0 [N/m]	固有角周波数 $\omega_n(t)$	10.0 [rad/s]
矢状軸方向減衰係数	1.0	水平軸方向減衰係数	1.4

シミュレーションでは牽引車両と車輪型倒立振子との間の基準相対距離を零とした。

車輪型倒立振子は振子を鉛直上方に保つようレギュレータで制御されている。このため、オブザーバ設計においてはオブザーバの極がレギュレータの極より複素平面の左半面に設定することが必要となる⁸⁾。ここでは、レギュレータの極を -2.75 , -3.82 に、オブザーバの極を -5.0 , $-5.5 \pm i$, $-6.0 \pm i$ に設定した。路面ロール角・ピッチ角がいずれも 15 [deg] のシミュレーション結果を図3～5に示す。

図3は支援機器および車輪型倒立振子台車の重心位置変位を示す。同図において、実線は支援機器の重心位置変位を、1点鎖線は車輪型倒立振子台車の重心位置変位を表す。

図3から、支援機器と車輪型倒立振子台車との相対距離が零に保たれていることが分かる。また、図4から、過渡状態では支援機器の重心速度が振動しているが、時間の経過とともに振動が減衰して車輪型倒立振子の重心速度に一致していることが分かる。さらに、図5に示すように制御時間内で振子傾き角が 0 [deg] に収束していることから、提案法によって、振子が鉛直上方に保持された車輪型倒立振子に対して支援機器が望ましい追従特性を示していることが分かる。

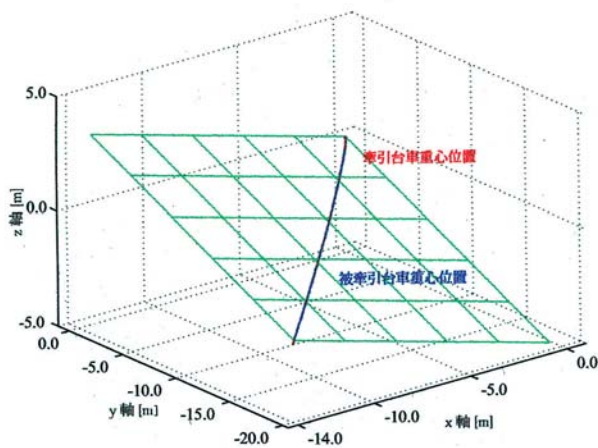


図3 車両重心位置 (路面ロール角・ピッチ角 15 [deg])

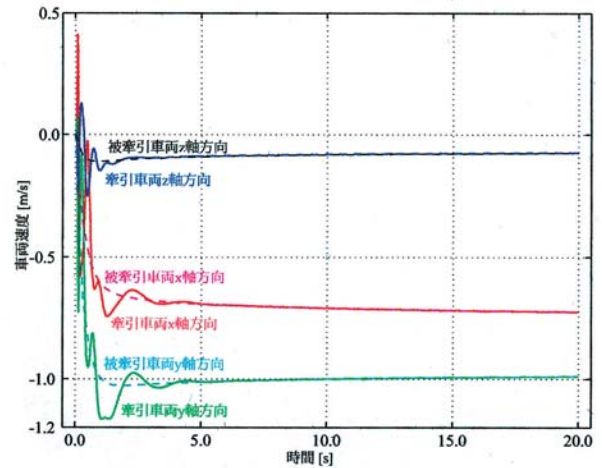


図4 車両重心並進速度 (路面ロール角・ピッチ角 15 [deg])

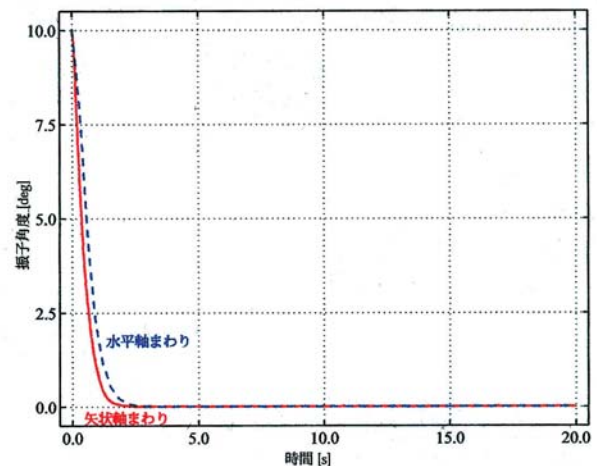


図5 振子角度 (路面ロール角・ピッチ角 15 [deg])

路面ロール角・ピッチ角が、それぞれ、-15 [deg] の場合の車両重心位置変位、車両重心並進速度および振子角変位を図6～8に示す。

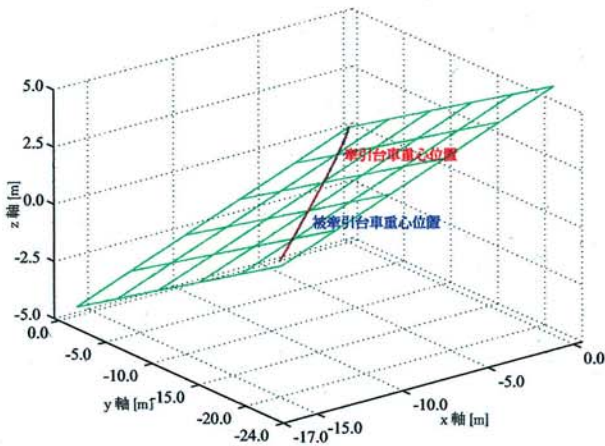


図6 車両重心位置 (路面ロール角・ピッチ角 -15 [deg])

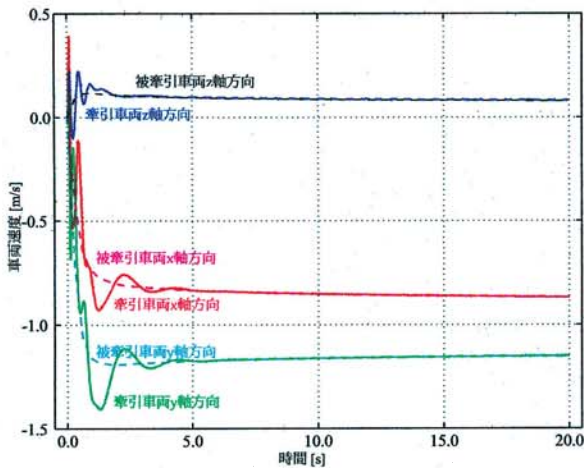


図7 車両重心並進速度 (路面ロール角・ピッチ角 -15 [deg])

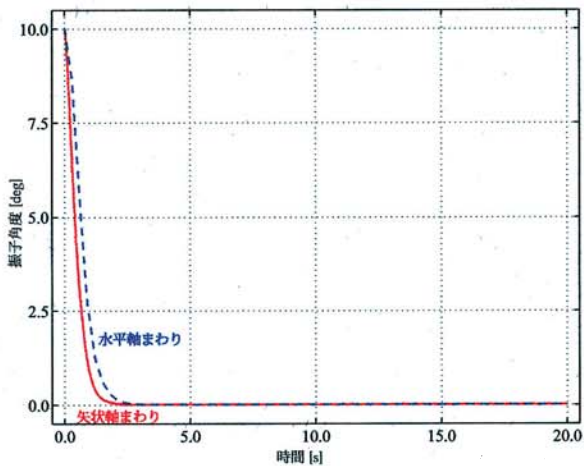


図8 振り角度 (路面ロール角・ピッチ角 -15 [deg])

図3~5と図6~8の対応するグラフ同士の比較から傾斜角に関わらず牽引車両が同じような追従特性を示していることが分かる。

以上の結果から、提案法によって路面傾斜角に対する頑健性と被牽引対象に対する良好な追従特性を持った牽引車両の挙動が実現できることが明らかになった。

5 おわりに

本論文では、自立歩行能力に不安を感じる人を対象とした歩行支援機器開発の糸口として、支援機器仕様検討のための歩行支援問題を提示してインピーダンス制御を用いた支援機器制御法を提案した。シミュレーション結果から、提案法を用いて路面傾斜角に対して頑健性を有し、ユーザモデルに対して良好な追従特性を実現できることが分かった。

高齢者あるいは下肢疾患患者の歩行支援では、牽引車両からの反作用力の性質が歩行支援の成否に大きな影響を及ぼす。筋力や平衡能力といった運動能力が低下している方の歩行支援を考えると、反作用力のゲイン特性のQ値が小さいことが望ましい。本論文の枠組みでは牽引車両からの反作用力も外乱とみなしてしまうため、オブザーバの状態変数からモデル化誤差と反作用力とを区別できない。モデル化誤差と反作用力とを異なるオブザーバで推定し、反作用力のゲイン特性を望ましいものに整形するための制御則の導出が今後の課題である。

参考文献

- 1) H. Hemami and R. L. Farnsworth: Postural and Gait Stability of a Planar Five Link Biped by Simulation; IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-22, No. 3, pp. 452-458 (1977)
- 2) H. Miura and I. Shimoyama: Dynamic Walk of a Biped; Int. J. of Robotics Research, Vol. 3, No. 2, pp. 60-74 (1984)
- 3) 匠英一: 「しぐさと心理」のウラ読み事典; PHP文庫 (2002)
- 4) 吉川恒夫: ロボット制御基礎論; コロナ社 (1988)
- 5) 樋口龍雄: 自動制御理論; 森北出版 (1989)
- 6) 岩井善太 他: オブザーバ; コロナ社 (1988)
- 7) 石島辰太郎 他: 非線形システム論; 計測自動制御学会 (1993)
- 8) 小郷寛 美多勉: システム制御理論入門; 実教出版 (1979)