

## 【論文】

## 船体動揺と立位姿勢応答

水口文洋<sup>1</sup> 東 明彦<sup>2</sup>Response of Upright Human Subjected to Base Excitation  
Caused by Ship MotionFumihiko Mizuguchi<sup>1</sup>, Akihiko Higashi<sup>2</sup>

## Abstract

The incident of the fall accident in use public transport is higher than that of in other place, because of the floor of the vehicle is excited. Knowing the influence of the rolling, pitching and yawing of the ship to the fall is important.

In this paper, the human body is modeled by triple inverted pendulum. The model that subjected to the acceleration disturbance measured on ship is stabilized by optimal feedback control. Temporal change in the posture of the triple link model on sagittal plane have been simulated. Joint torques for maintaining a standing posture are obtained from the simulation. Monitoring the movement of the center of gravity due to posture change, we investigated the relationship between the joint torques and the center of gravity inside and outside a stable area of the base of support. We considered the necessary condition for fall-prevention strategy by using the obtained results.

**Keywords:** Fall Accident, Triple Link Model, Optimal Feedback Control

## 1 はじめに

総務省統計局によれば我が国の 65 歳以上の高齢者人口は 3186 万人 (平成 25 年 9 月 15 日現在推計) で、総人口の 25% となり 4 人に 1 人は高齢者となった。この割合は今後も上昇を続け、11 年後の平成 47 年には 3 人に 1 人が高齢者となると予測されている。高齢者の転倒は寝たきりや要介護の状態につながる可能性が大きく、転倒予防の重要性が高まっている。また、平成 16 年にスタートした「転倒予防医学研究会」は今年度 4 月に「日本転倒予防学会」として生まれ変わり、医学的な見地からだけでなく、社会科学から人文科学にわたり広く転倒と転倒予防に関する情報とネットワークを提供する学会として発足する等社会的にも関心が高まっていることを窺わせる。転倒は高齢者に限定されず、成人の健常者においても電車バス等の移動中の乗り物等おかれた環境条件によって起こりうる。

歩行中の転倒についての研究には、支援機を用いた転

倒防止制御方法の研究<sup>1) 2)</sup>や、転倒メカニズムの解析と防止の研究<sup>3)</sup>、日常動作と転倒動作の分離判別方法の研究<sup>4)</sup>等がある。一方外乱による転倒についての研究はあまり行われていない。基礎的研究として静止状態での立位姿勢での研究には、倒立振り子モデルを使った外力に対する立位姿勢制御に関する研究<sup>5)</sup>、乗車中の立位姿勢と床の動きと応答姿勢の研究<sup>6)</sup>等が行われている。これらはどれも水平外乱に対する応答を扱ったものであり、垂直外乱も同時に受ける場合については、過渡的で小さい場合についてのものしかない。

我々は船内での転倒防止の観点から、3 リンクモデルに水平外乱が加わった場合、姿勢を保持するために必要な関節トルク<sup>7)</sup>を実験から求めた。ここではさらに 3 次元的に動揺する船舶に乗船した人を想定し、3 リンク倒立モデルを作成して、床面に水平垂直方向の外乱加速度が加わった場合の応答を求めた。外乱加速度は北米航路の約 4 万 5 千総トンの自動車運搬船の動揺データを使用し、転倒防止戦略の必要性の有無についても吟味した。

Received November 14, 2014

<sup>1</sup> 海上保安大学校 mizuguchi@jcga.ac.jp

<sup>2</sup> 海上保安大学校 higashi@jcga.ac.jp

## 2 解析モデル

体の動作を解析する場合、幾つかのセグメントにわけ解析することは一般的に行われている。ここでは、図1に示すように、人体を下から順に、脚部（リンク1）、胴部（リンク2）及び頭部（リンク3）の3つのセグメントから構成されていると仮定し、3リンクの倒立モデルを解析モデルとした。リンク間の関節は、床面と脚部間の足関節、脚部と胴部間の股関節、胴部と頭部間の頸関節であり、それぞれ関節の受動伸縮特性を有するとした。

図中の  $m$  は質量、 $J$  は慣性モーメント、 $\ell$  はセグメントの長さ、 $\ell_g$  は重心までの長さ、 $\theta$  は関節角度、 $T$  は関節トルクを表している。また、 $c$  と  $T_k$  は関節の受動特性<sup>8)</sup>とし、それぞれ粘性係数と弾性抵抗モーメントを表しており、添え字は各関節を表している。ここで  $zy$  平面は矢状面を表わし、本研究では床面に水平( $y$ ) 及び鉛直( $z$ ) 方向に加速度外乱が加わる場合を想定し、矢状面における解析を行った。

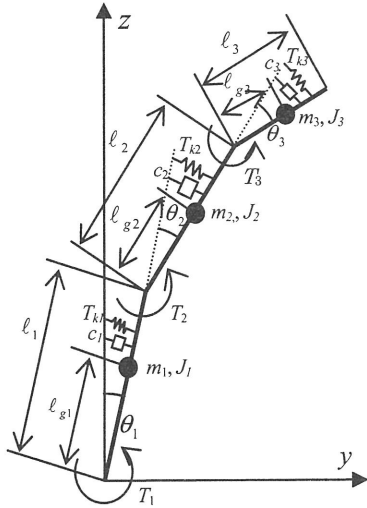


図1 倒立3リンクモデル

### 2.1 運動方程式

3リンク倒立モデルでは、運動は矢状面でのみ起こり、腕は運動への影響が小さいとして省略するとともに、床面と脚接触部は一体となって移動すると仮定した。この仮定のもとに、運動エネルギー・ポテンシャルエネルギー・損失エネルギー・一般化力から3リンク倒立モデルのLagrangeの運動方程式を求めると式(1)が得られた。

この式を見ると先に報告している論文で求められた3リンクモデルの運動方程式<sup>7)</sup>に、さらに関節の受動特性の影響が加わった式となっている。

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{k1}(\theta_1) \\ T_{k2}(\theta_2) \\ T_{k3}(\theta_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{v1} \\ A_{v2} \\ A_{v3} \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} -A_{H1} \\ -A_{H2} \\ -A_{H3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで  $g$  は重力加速度、 $\ddot{y}$  と  $\ddot{z}$  はそれぞれ  $y$  及び  $z$  方向に加えられた加速度外乱を表す。なお1項目の慣性モーメント  $J$  のマトリックスは対称マトリックスである。各項の係数は次のとおりである。

$$\begin{aligned} J_{11} &= m_1 \ell_{g1}^2 + J_1 + m_2 \{ \ell_1^2 + \ell_{g2}^2 + 2\ell_1 \ell_{g2} \cos \theta_2 \} + J_2 + J_3 + \\ &+ m_3 \{ \ell_1^2 + \ell_2^2 + \ell_{g3}^2 + 2\ell_1 \ell_2 \cos \theta_2 + 2\ell_1 \ell_{g3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2\ell_2 \ell_{g3} \cos \theta_3 \} \\ J_{12} &= m_2 \{ \ell_2^2 + \ell_{g2}^2 + \ell_1 \ell_{g2} \cos \theta_2 \} + J_2 + J_3 + \\ &+ m_3 \{ \ell_2^2 + \ell_{g3}^2 + \ell_1 \ell_2 \cos \theta_2 + \ell_1 \ell_{g3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2\ell_2 \ell_{g3} \cos \theta_3 \} \\ J_{13} &= m_3 \{ \ell_{g3}^2 + \ell_1 \ell_{g3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + \ell_2 \ell_{g3} \cos \theta_3 \} + J_3 \\ J_{22} &= m_2 \ell_{g2}^2 + J_2 + m_3 \{ \ell_2^2 + \ell_{g3}^2 + 2\ell_2 \ell_{g3} \cos \theta_3 \} + J_3 \\ J_{33} &= m_3 \ell_{g3}^2 + J_3 \\ J_{23} &= m_3 \{ \ell_{g3}^2 + \ell_2 \ell_{g3} \cos \theta_3 \} + J_3 \\ V_1 &= -\{ m_2 \ell_1 \ell_{g2} (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) + m_3 \ell_1 \ell_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \} \sin \theta_2 - \\ &- m_3 \ell_1 \ell_{g3} (\dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_3^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) - \\ &- m_3 \ell_2 \ell_{g3} (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) \sin \theta_3 \\ V_2 &= -\{ m_2 \ell_1 \ell_{g2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_3 \ell_1 \ell_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \} \sin \theta_2 - \\ &- m_3 \ell_1 \ell_{g3} (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) - m_3 \ell_2 \ell_{g3} (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) \sin \theta_3 \\ &+ m_2 \ell_1 \ell_{g2} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 + m_3 \ell_1 \ell_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \\ &+ m_3 \ell_1 \ell_{g3} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ V_3 &= -m_3 \ell_1 \ell_{g3} (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) - \\ &- m_3 \ell_2 \ell_{g3} (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \sin \theta_3 + m_3 \ell_1 \ell_{g3} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ &+ m_3 \ell_2 \ell_{g3} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \sin \theta_3 \\ A_{v1} &= -m_1 \ell_{g1} \sin \theta_1 - m_2 \{ \ell_1 \sin \theta_1 + \ell_{g2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \} \\ &- m_3 \{ \ell_1 \sin \theta_1 + \ell_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + \ell_{g3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\ A_{v2} &= -m_2 \ell_{g2} \sin(\theta_1 + \theta_2) - m_3 \{ \ell_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + \ell_{g3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\ A_{v3} &= -m_3 \ell_{g3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ A_{H1} &= m_1 \ell_{g1} \cos \theta_1 + m_2 \{ \ell_1 \cos \theta_1 + \ell_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \} \\ &+ m_3 \{ \ell_1 \cos \theta_1 + \ell_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \ell_{g3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\ A_{H2} &= m_2 \ell_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_3 \{ \ell_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \ell_{g3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\ A_{H3} &= m_3 \ell_{g3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{aligned}$$

式(1)は非線形であることから、線形化を行って状態方程式の形にまとめると次のような加速度外乱をとまう式として表すことができる。

$$\dot{x} = Ax + Bu + C\alpha \quad (2)$$

ここで

$$x = [\theta_1 \quad \dot{\theta}_1 \quad \theta_2 \quad \dot{\theta}_2 \quad \theta_3 \quad \dot{\theta}_3]^T \quad (3)$$

$$u = [T_1 \quad T_2 \quad T_3]^T \quad (4)$$

$$\alpha = [\ddot{y} \quad \ddot{z}]^T \quad (5)$$

## 2.2 最適フィードバック

(A,B)が可制御である制御対象

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x(0) = x_0 \quad (6)$$

において、評価関数

$$I = \int_0^\infty [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (7)$$

を最小にする制御入力 $u(t)$ を求める。次のリカッティの行列方程式

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (8)$$

を満たす正定唯一解  $P$  から、最適フィードバックゲイン  $K$  が求まる。

$$K = R^{-1}B^T P \quad (9)$$

最適制御則は

$$u(t) = -Kx(t) \quad (10)$$

与えられ、各関節に加えられる制御トルクになる。

## 2.3 立位安定性

立位姿勢で床（地面）と接している両足部分と、それに挟まれた面は支持基底面と呼ばれる。支持基底面内に重心があれば姿勢を安定に保てるが、これを外れると何らかの防止動作を行わなければ、バランスを崩して転倒することになる。ここでは矢状面内での運動を想定しているの、足の側面部のみに着目する。図2に示すように踵を起点とし、爪先までを100%とすれば、若年者の場合ハッチングで示される30から60%の範囲に重心があれば安定であるとされている。この範囲から外れると安定性が大きく失われ、転倒防止のための動作（Ankle・Hip・Step strategy）が必要になるといわれている。

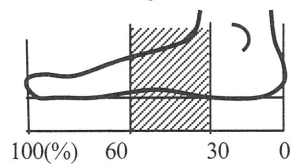


図2 若年者の安定な重心位置

## 3 数値シミュレーション

シミュレーションにおいては、被験者として22歳の健常者の男性の諸量を用いた。被験者は身長

表1 被験者の身体特性

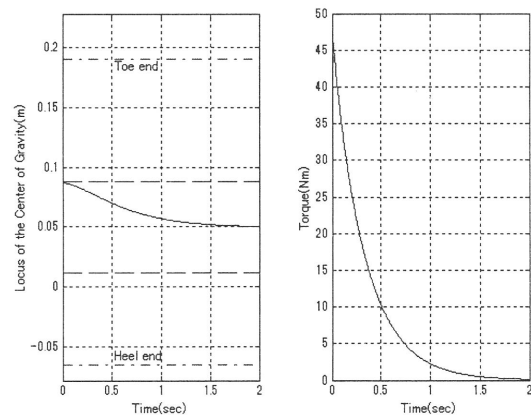
	脚部	胴部	頭部
全長 $\ell$ (m)	0.785	0.525	0.31
重心距離 $\ell_g$ (m)	0.4942	0.2662	0.0555
質量 $m$ (kg)	22.4	39.08	4.81
慣性モーメント $J$ (kgm <sup>2</sup> )	0.95	1.12	0.106

170cm、体重 69.7kg であり、身体各部分の質量、質量中心比、回転半径は阿江<sup>9)</sup>等の推定式を使って求めた。被験者の身体特性を表1に示す。ただし、両腕は身体応答への影響が小さいとして省略した。

## 3.1 モデルの妥当性の検討

### 3.1.1 前傾後傾テストによる比較

被験者が体を棒のように直線に保った状態で、自発努力で前後最大角度まで傾斜させた状態から直立姿勢に戻る場合の特性を求めた中野<sup>10)</sup>等の実験結果と比較した。シミュレーション結果を図3に示す。図3(a)の縦軸は足関節部を原点として爪先方向をプラスとして足座標を表し、重心の移動軌跡を求めた結果である。被験者の足関節から爪先までの長さは190mm、足関節から踵までの長さは75mmであり、爪先と踵を一点鎖線で表している。図中の破線が若年者の安定限界線を示しており、この破線で囲まれる範囲が安定範囲である。実線が重心の移動軌跡を表している。この図より、若年者の安定範囲の限界値まで重心を移動させた場合、時間とともに安定部の中心に移動して安定化することが分かる。図3(b)は安定位置に戻すために必要な足関節トルクの時間的変化を表している。限界状態での足関節トルクが45Nmになり、中野等の実験結果とよく一致する。



(a) 重心移動軌跡

(b) 足首関節トルク

図3 初期角度に対する応答

### 3.1.2 床水平正弦波振動実験との比較

立位姿勢を保った状態で、床を水平に正弦波状に、振幅 2.5cm、周波数 0.5Hz で変位加振した場合の足圧中心位置と下腿筋の筋電図を求めた藤原<sup>11)</sup>らの実験と比較を行った。ここでは前記振幅と周波数に相当する水平加速度外乱の振幅 0.247m/s<sup>2</sup> をモデルに与えてその応答を求めた結果を図4に示す。藤原等の実験では、床励振周期と等しい 5cm 程度の両振幅応答が得られているが、本シミュレーションにおいても

両振幅で 4cm 程度となり、若干小さいもののほぼ同様の応答が得られている。図は安定位置を 0 とし、前後方向の重心の移動を＋で表している。

従って前後傾倒テストによる限界安定関節トルクの値と、床水平正弦波振動の応答結果の何れも実験結果と良く一致することから、本モデルは人体の運動特性を良く表わしているといえるので、このモデルを使って解析することとした。

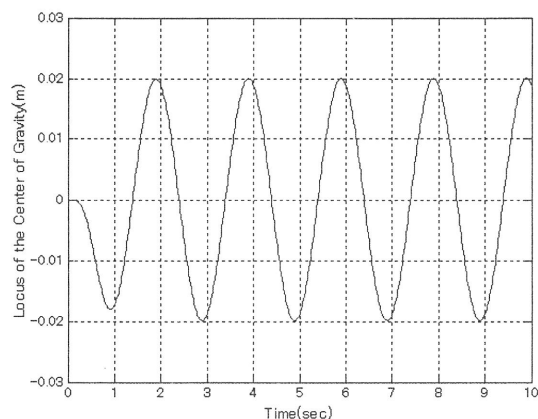


図4 床水平正弦波加速度外乱による応答

### 3.2 船体動揺に対する応答

#### 3.2.1 動揺データ

船体動揺データには、北米航路の約 4 万 5 千総トンの自動車運搬船の動揺データを用いた。またこの動揺データには、先に報告した波の方向と目視波高が、船体動揺を代表する有義加速度に及ぼす影響を求めた著者等の論文<sup>12)</sup>と同様のフィルタ処理を行った。また船首尾方向の加速度は、左右舷方向の加速度や鉛直方向の加速度に比べ非常に小さいので、ここでは左舷方向を向いて立っている場合を想定し、3 リンクモデルの前後(y)方向と鉛直方向(z)に加速度外乱を受ける場合の応答を求めた。

#### 3.2.2 船体動揺と立位姿勢応答

気象は海洋では、波高や波向、風速や風向等の海象に影響を及ぼす。海象だけでなく、航行する船舶の大きさや形状、積み荷の状況や航行速度や針路等様々な因子が船舶の動揺に大きく影響する。

ここでは動揺に影響を及ぼす因子について斟酌することなく、結果として発生する動揺が、立位姿勢の人体に与える影響を 2 つのケースについて解析する。重心移動が、解析期間(204sec)中に安定範囲内に止まる程度の動揺(Case1)と、解析期間中に安定範囲を数回超えるような動揺(Case2)について解析を行った。それぞれの船体動揺をもたらした海象状況

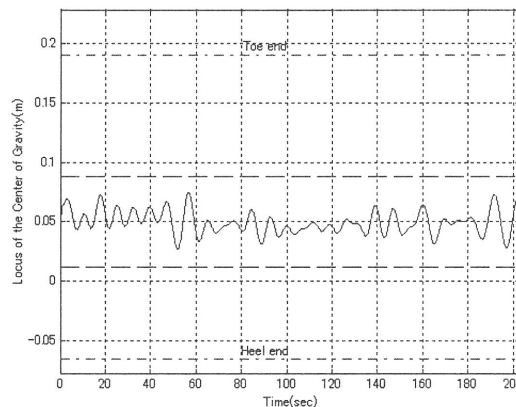
を表 2 に示す。表中の相対風向と波高のアルファベット P と S は左舷と右舷方向を表し、その後の数値は船首から各方向への角度を表している。

モデルは左舷方向を向いた状態としているため、船舶が海象により動揺して舷側方向と鉛直方向の加速度外乱を受けることで、モデルは矢状面内の姿勢

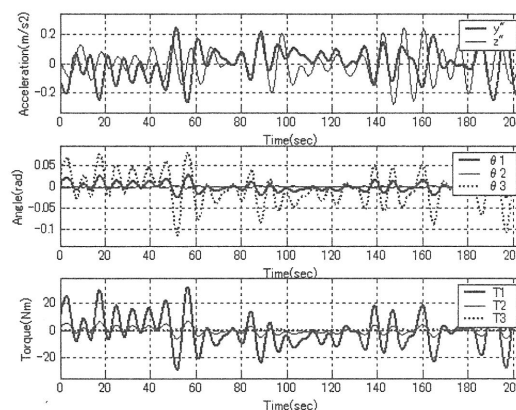
表2 海象の状況

Case	針路 (°)	速力 (knot)	風		波		
			相対 風向 (°)	相対 風速 (m/s)	相対 波向 (°)	波高 (m)	周期 (sec)
1	191	14.7	S30	43	S50	3.5	5
2	95	17.9	P90	17.9	P120	5.0	12

変化を生ずる。図 5 は比較的穏やかな海象(Case1)状況における船体動揺と立位姿勢応答を示している。図 5(a)は姿勢変化に伴う重心移動の時間的変化を示している。重心は破線で囲まれる安定範囲に収まっていることが分かる。図 5(b)の上段は船舶の動揺に伴う左舷(y)方向と鉛直(z)方向の外乱加速度の時間



(a) 重心の移動軌跡



(b) 加速度外乱による姿勢と関節トルク

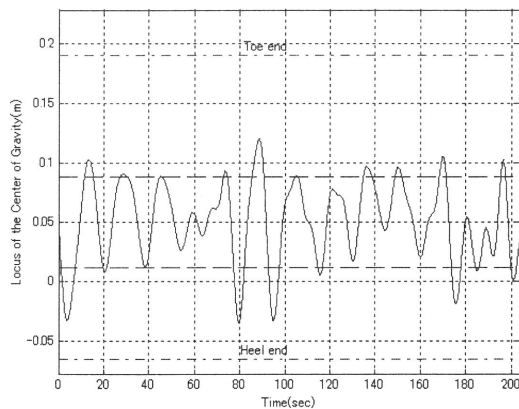
図5 船体動揺と立位姿勢応答(Case1)

的变化を、中段は姿勢変化を示す各関節角度の時間的变化を、そして下段は安定姿勢に戻すに必要な関節トルクをそれぞれ表している。

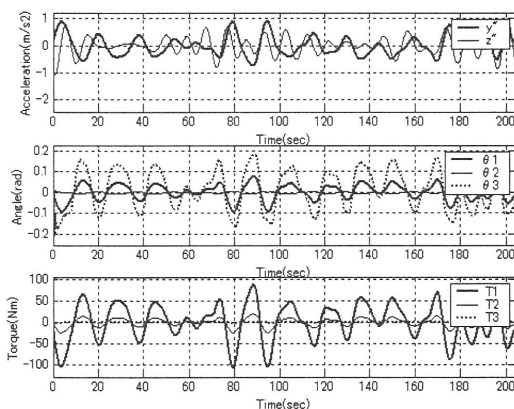
この図から、重心移動軌跡と  $y$  方向加速度の波形が良く似ていることから、重心移動は主に  $y$  方向加速度に影響を受けていることが分かる。 $y$  方向に負の加速度を受けると前傾することになるので、重心は爪先(正)方向に移動することになるため、 $y$  方向加速度と重心移動の変化は時間軸に対して反転した特性になっている。

また、頸関節角度は足関節角度と股関節角度に比べると大きい、頸関節トルクは足関節トルクと股関節トルクに比べると非常に小さいことを示している。姿勢変化をもたらす重心移動の時間的变化は、それを安定化させるための足関節トルクの時間的变化と酷似している。一方、足関節トルクと  $y$  方向加速度は時間軸に対して反転した特性となる。

図6は荒れた海象(Case2)状況での姿勢変化に伴う重心移動の時間的变化を示している。図6(a)で示すようにほぼ10秒に1回の割合で安定範囲を超える重心移動を受けることになり、このため転倒防止動



(a) 重心の移動軌跡



(b) 加速度外乱による姿勢と関節トルク

図6 船体動揺と立位姿勢応答(Case2)

作が必要になる。船舶上では様々な突起物や障害物があり、床面も海水などで濡れて滑りやすい状況になっていることもあり、必ずしも十分な対応動作ができない場合も考えられることから、転倒の恐れは一層大きくなる。このことから、右舷または左舷方向を向いて立位姿勢を取る場合、両脚は肩幅程度開いた状態で更に右足または左足を半歩前へ踏み出した姿勢を取ることが転倒防止につながると思われる。この姿勢をとることで基底面の拡大と、前後方向の突発的な動揺に対するスムーズなステップ戦略を可能にする。

Case1 の場合は安定化に必要な関節トルクは最大 30Nm であるが、Case2 の場合には重心は既に安定範囲を超えてしまっているため、転倒防止のための何らかの動作を取らなければならないが、安定範囲の概念を考慮しなければ最大 100Nm 必要である。また、鉛直( $z$ )方向の加速度外乱の大きさや左舷( $y$ )方向の加速度外乱の周期にも影響すると思われるが、このケースでは重心を安定範囲に保つに必要な足関節トルクは、図6(a)から重心の安定限界時に対応する時刻の足関節トルクを図6(b)より読み取ればほぼ 50Nm であり、転倒を回避するにはこれ以上のトルクを足関節で発生させる必要がある。

#### 4 結論

倒立3リンクモデルの運動方程式を用いて、船の動揺によって床面に発生する加速度外乱を与え、最適フィードバック制御を行って安定化させ、安定化に必要な各関節の安定化トルクと関節角度を求めた。さらに姿勢変化に伴う重心の移動軌跡を求め、安定性について吟味した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 姿勢変化に及ぼす加速度外乱の主因は水平方向であり、垂直方向のものの影響は小さい。
- (2) 重心の安定限界点から安定化させるための足関節トルクは 50Nm 以上必要である。

#### 参考文献

- 1) 川澤延弘, モータ付き歩行支援機を用いた転倒防止のための制御, 高知工科大学大学院修士論文, 平成 14 年度.
- 2) 松下準, 歩行支援機における転倒防止制御技術の開発, 高知工科大学卒業論文, 平成 16 年度.
- 3) 浜克己, 川上健作, 森谷健二, 歩行支援機を用いた転倒に関するメカニズムの解析とその防止, 函館工業高等専門学校紀要(第 41 号), 2006, 7-12.
- 4) 青柳俊一 他, 機械学習による人の転倒動作のオンライン判別方法, 日本機械学会論文集(C 編),

Vol. 76, No772, 2010, 500-531.

- 5) 藤澤和大, 石田水里, 佐川貢, 外力に対する立位姿勢制御時の頭部運動に関する検討, 計測自動制御学会東北支部第 229 回研究集会, 資料番号 229-2, 2006.
- 6) 杉本太志 他, 床励振を受ける立位姿勢人体の応答における加齢の影響, 日本機械学会 [No.11-2]D&D Conference 2011CD-ROM 論文集, 2011, 119.
- 7) 水口文洋, 東明彦 他, 船体の動揺と転倒に関する基礎的研究, 海上保安大学校研究報告, Vol.55, No.1-2, 2011, 35-40.
- 8) 日本機械学会編, 「バイオメカニクス数値シミュレーション」, コロナ社, 1999.
- 9) 阿江通良ほか, 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定, バイオメカニズム, 11, (1992)23-33.
- 10) 中野紀夫ほか, 足関節モーメントを用いた動的バランス機能加齢変化の定量的評価法, 松下電工技法, Aug.(2003),39-43.
- 11) 池上晴夫編, 「身体機能の調節性」, 朝倉書房, 1997, 191.
- 12) 水口文洋, 東明彦, 大鍋寿一, 目視波高と船体動揺について, 海上保安大学校研究報告, Vol.53, No.1-2, 2010, 9-13.