

令和 4 年 5 月 20 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04315

研究課題名（和文）予測型体性感覚と感覚統合に基づく人の動的バランス能力の評価指標策定とその検証

研究課題名（英文）Modeling of human dynamic balance ability based on predictive somatosensory and sensory integration

研究代表者

横田 祥（Yokota, Sho）

東洋大学・理工学部・准教授

研究者番号：40434386

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、移動するPM（Personal Mobility）の外力に伴う姿勢制御と姿勢の揺れが生じるという他動的移動運動という条件の下、動的バランス能力の定量的指標を見出すことにある。得られた成果は次の通りである。立位時の床面の荷重重心位置と身体傾斜には比例の関係がある。動的バランス能力も、重心動揺を用いて表すことが可能である。他動運動における人のバランス制御モデルは、足首に微先行型PD制御を組み込んだモデルが妥当であること。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バランス能力のモデル化について、これまでの多くの研究が、静的な立位姿勢維持や安定歩行運動を対象としている。一方、日常生活では移動体（電車、車など）乗車時に、他動的な力（外力ともみなせる）が働き、これに対抗してのバランスを発揮する場面が多々ある。このような他動的ケースでのバランス能力がどのように表されるのか、またその測定法を考察した例はみない。

この課題に対し、本研究は、開発したパーソナルモビリティに搭乗し身体傾斜で操作する場面を取り上げ、動的なバランスモデルを見出した。このモデルは、人々の安全な移動を実現するモビリティの開発に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）： The purpose of this study is to find a quantitative index of dynamic balance ability under the condition of riding a mobile platform, that is, postural control and postural sway caused by external forces on a moving Personal Mobility (PM). The results obtained are as follows. There is a proportional relationship between the center of gravity and body inclination on the floor in the standing posture. Dynamic balance ability can also be expressed using center-of-gravity sway. The model of human balance control in the dynamic motion should be a model that incorporates differential-precedence-type PD control at the ankle.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：感覚行動システム バランス パーソナルモビリティ

### 1. 研究開始当初の背景

バランス能力の維持は、身体運動機能の維持や、アクティブシニアの健康寿命の延伸の観点から重要な課題である。一般的にバランス能力は静止しようとする姿勢維持能力とされ、視覚、体性感覚、前庭感覚の統合に基づいた身体運動によって実現される。これまでに視覚、体性感覚と前庭感覚のそれぞれの感覚の定量化の試みと姿勢維持に関する研究がある。しかしながら、多くの研究が、静的な立位姿勢維持やトレッドミル上での直進する安定歩行運動を対象としている。一方、日常生活では移動体(電車、車など)乗車時や非平面(段差、傾いた道など)移動のときに、他動的な力(外力ともみなせる)が働き、これに対抗してのバランスを発揮する場面が多々ある。このような他動的ケースでのバランス能力(動的バランス能力と称す)がどのように表されるのか、またその測定法を考察した例は少ない。

そこで、本研究は、開発したPM(Personal Mobility)を用いて動的に働く他動的な力を客観的・定量的に生成し、これを被験者に与えることで動的バランスを測ることを考える。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、移動するPMの外力に伴う姿勢制御と姿勢の揺れが生じるといふ他動的移動運動という条件の下、動的バランス能力の定量的指標を見出すことにある。

### 3. 研究の方法

以下に示す手順と内容について研究を行った。

#### (1) 全方向移動PMの開発

客観的な他動的移動運動を被験者に与えるために、全方向に移動可能なPMを用意した。このPMの全方向移動のために、耐荷重が高いメカナムホイールを採用した。また、他動運動時の身体のバランスを測定する手段として、搭乗面に片足につき4つ、計8個のロードセルを設置した。図1が製作したPMの全体図である。

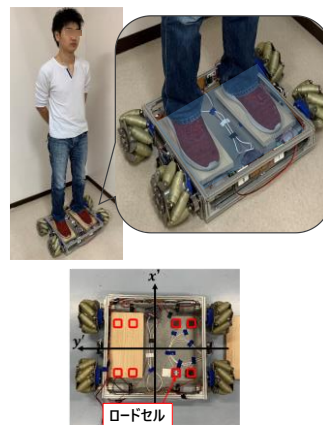


図1 開発した全方向移動PM

#### (2) 身体傾斜の推定

人の静止立位姿勢において、身体の重心線(重心位置をとおり床面に対して垂直な直線)が床面と交わる位置と床面における荷重分布中心位置は近似できる[1]。また、人の身体重心位置は、成人の場合、床面から身長約55%の位置にある[2]。これらから、床面の荷重分布中心位置から幾何学的に身体傾斜を推定した。そのために、被験者が状態を動揺させながら、PM搭乗面の荷重情報(8つのロードセルの値)と被験者の上半身にとりつけられたジャイロ・加速度センサの値から、身体傾斜を推定した。図2が、その時の様子である。

#### ジャイロ・加速度センサ

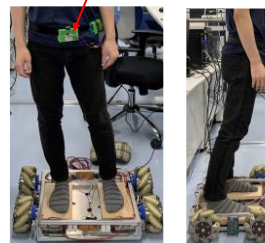


図2 測定実験の様子

#### (3) 他動運動を想定した身体傾斜時のバランスモデルの検討

他動運動上では、人はバランスを保つために身体を傾斜する。このときの身体傾斜角の目標値は、上体が倒れない身体角度であり、この角度は、体性感覚に基づき暗黙の内に設定される。このバランスモデルを見出すためには、まずは、ある目標値に追従するモデルが必要不可欠である。関連研究[3]では、直立時のモデルは提案されているが、身体を傾斜した場合のモデルは明らかにされていない。そのため、実験を行い、身体傾斜時の目標角度の追従モデルを明らかにし身体傾斜時のバランスモデルを見出した。このモデルを見出すために身体傾斜の目標値に対するステップ応答を求めることとした。そのために、図3に示すように、身体を傾斜して、胸部がビニル紐に触れる位置を目標傾斜角とし、直立状態から目標傾斜角まで身体を傾斜させた場合の上半身の姿勢を計測した。

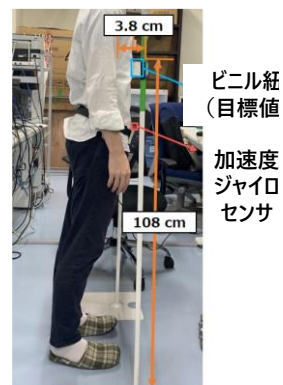


図3 実験の様子

#### (4) PMの操作を例にしたバランスモデルの検証

見出したバランスモデルの妥当性を評価するために、図1のPMの操作に組み込み、身体のバランスを維持した状態で安定した操作が否かを確かめた。PMに登場する被験者は、PMと一体となった倒立

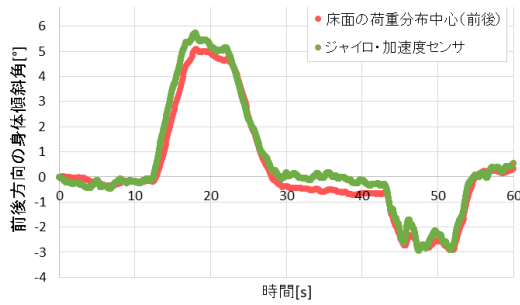


図4 身体傾斜の推定結果(赤)と実測値(緑)

振子として扱うことができる。したがって、倒立振子モデルに見出したバランスモデルを組み込み、その性能を評価する。この評価の対照として、バランスモデルを組み込まない倒立振子モデルのみのモデルも用意した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 身体傾斜推定

8つのロードセルの荷重分布中心を算出し、その位置に基づき幾何学的に身体傾斜を推定した。その結果を図4に示す。この図から、床面の荷重分布中心位置から、搭乗面と人の幾何学的関係から身体傾斜をおおよそ推定することができた。つまり、搭乗面における重心位置と身体傾斜には比例の関係があることが分かった。

##### (2) 身体傾斜時のバランスモデル

図3の実験結果を図5に示す。この図が身体を傾斜させたときの人のバランスを保つ身体動作を表す。このグラフを再現するモデルを考えた。人がバランスを維持するときに、足首回りにトルクを加え、バランスを維持する。そのため、姿勢維持のトルクモデルがバランスモデルであるととらえることができる。本研究では、このバランスモデルは体性感覚をなす足関節の受動的弾性係数と粘性係数と、能動的なトルクを含むモデルとした。そして、このトルクを制御するモデル(バランスモデル)として微分先行型PD制御が、図5の応答に最も近いモデルであることを見出した。その時の応答を図6に示す。図5と比較し、おおよそ外形が同じ形をしていると言える。

##### (3) バランスモデルのPM操作による検証

足首のトルクを微分先行型PD制御で与えたバランスモデルを倒立振子モデルに取り込み、PMの操作シミュレーションを行った結果を図7に示す。また図8に倒立振子のみのモデルの結果を示す。バランスモデルを加えた場合は身体傾斜(青色)が収束しており、身体動揺が起きずに、状態を維持している。一方、図8は、身体傾斜(青色)が振動しており、バランスが保たれていないことが分かる。このため、他動運動におけるバランスモデルは(2)で見出したモデルが妥当であると言える。

#### 参考文献

- [1] 藤原勝夫, 池上晴夫: “足圧中心と立位姿勢の安定性との関係について”, 体育学研究 第26巻 2号, pp. 137-147(1981)
- [2] 中村隆一, 他: “基礎運動学 第6版”, 医歯薬出版, pp.332-333(2007)
- [3] Y. Asai, Y. Tasaka, K. Nomura, T. Nomura, M. Casadio, P. Morasso, “A Model of Postural Control in Quiet Standing: Robust Compensation of Delay-Induced Instability Using Intermittent Activation of Feedback Control,” PLoS ONE, vol. 4, 2009.

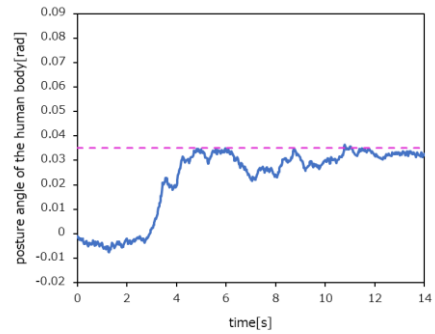


図5 目標角度に追従する身体傾斜

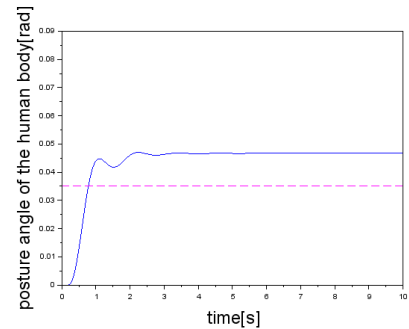


図6 微分先行型PD制御モデルの応答

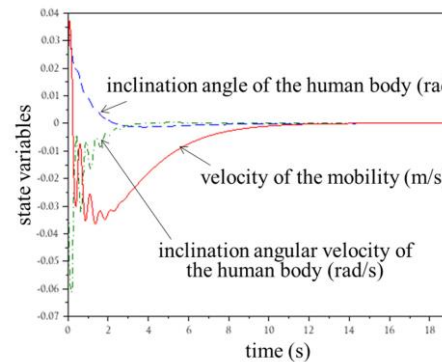


図7 身体傾斜(青)とPMの速度(赤)

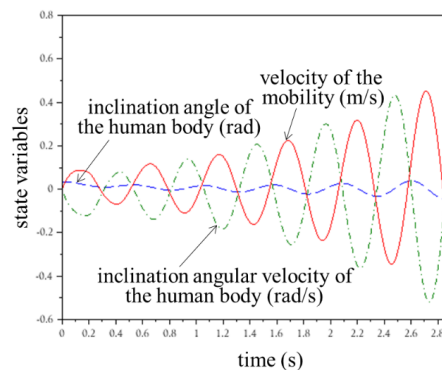


図8 身体傾斜(青)とPMの速度(赤)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Suzuki Mitsuhiro, Yokota Sho, Matsumoto Akihiro, Chugo Daisuke, Hashimoto Hiroshi	4. 巻 1
2. 論文標題 Simulation of Omni-Directional Low-Floor Mobility Controlled by Inverted Pendulum and Human Postural Control Model in forward-backward direction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society	6. 最初と最後の頁 2668 - 2674
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IECON43393.2020.9254558	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chugo Daisuke, Yokota Masahiro, Muramatsu Satoshi, Yokota Sho, She Jin-Hua, Hashimoto Hiroshi, Katayama Takahiro, Mizuta Yasuhide, Koujina Atsushi	4. 巻 1
2. 論文標題 Standing Assistance Control based on Voluntary Body Movement within Safety Tolerance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE 16th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)	6. 最初と最後の頁 177 - 182
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/AMC44022.2020.9244314	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Mitsuhiro, Yokota Sho, Matsumoto Akihiro, Chugo Daisuke, Hashimoto Hiroshi	4. 巻 1
2. 論文標題 A Control Model for Following Target Inclination Angle in Lateral Direction for Omni-Directional Low-Floor Mobility	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IECON 2021 - 7th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IECON48115.2021.9589749	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 藤井 正彬, 横田 祥, 松元 明弘, 中後 大輔, 橋本 洋志
2. 発表標題 歩行支援機能付きパーソナルモビリティの開発 第 5 報：歩行アシストモードにおける筋電測定
3. 学会等名 第21回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mitsunori Ouchi, Sho Yokota, Akihiro Matsumoto, Daisuke Chugo, Hiroshi Hashimoto
2. 発表標題 Seated Posture Estimation of a Visual Display Terminal Worker using Single Web Camera and Iris Diameter - Report on the preliminary experiment -
3. 学会等名 12th International Conference on Human System Interaction, HSI 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 満裕, 横田 祥, 松元 明弘, 中後 大輔, 橋本 洋志
2. 発表標題 倒立振り子モデルと人の立位安定化制御モデルを取り入れた低床全方向モビリティの開発 第一報：搭乗面の荷重分布情報のみによる身体傾斜推定
3. 学会等名 第20回システムインテグレーション部門講演会 (SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 満裕, 横田 祥, 松元 明弘, 中後 大輔, 橋本 洋志
2. 発表標題 低床全方向モビリティの制御
3. 学会等名 電気学会産業用部部門次世代産業システム研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------