

令和元年5月23日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00357

研究課題名(和文) 主観的移動感覚モデルに基づく人の動的バランス能力

研究課題名(英文) Dynamic balance ability based on subjective movement sensation model

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：人間のバランス能力は、視覚、体性感覚、前庭感覚の感覚統合に基づいている。本研究の目的は、人工物の移動手段を利用した他動的移動運動という条件の下、感覚量を効果的に表現する方法を見出し、動的バランス能力について考察した。視覚に基づく主観的な視線の高さは、多項式モデルで表せることを見出した。また、視覚、体性、前庭感覚に基づく主観的な移動感覚も物理速度の3次多項式でモデル化できることが分かった。そして、着座した状態での他動運動における身体動作モデルは、おおよそ2次遅れ系で表わすことができ、立乗り型他動運動の発進時における人の動的バランス能力は、静的なバランス能力と相関があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのバランス能力は、移動運動を伴わない静的な環境下で考察されていたため、その適用範囲は限定的であった。本研究の学術的意義は、感覚量を定量表現する方法を提案し、人工物による他動運動という条件のもとでの主観的な移動感覚モデルを実験的に導いたこと、立乗り型のパーソナルモビリティにおける動的バランス能力と静的バランス能力に相関があることを見出したこと、着座型のパーソナルモビリティ乗車時の身体動作モデルが2次遅れ系でモデル化できることを明らかにした点にある。これらの知見をベースにして、移動機器使用時の安全走行等に役立てることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop the measuring method for three sensations being visual, somatic and vestibular sensation under the condition of passive locomotive movement such as riding a personal mobility, and to consider the dynamic balance ability. The subjective height sensation based on visual sensation can be expressed by polynomial model. In addition, subjective movement sensation based on visual, somatic and vestibular sensation can be also expressed by 3rd polynomial model. The human motion in case of seating type personal mobility can be modeled as 2nd order lag system. It turned out that there are correlation between static balance ability and dynamic balance ability on a standing ride type personal mobility.

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 主観的移動感覚

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

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のみならず、移動手段（シニアカー、車いす、電車、バス等）利用時の転倒防止の観点からも重要な課題である。一般的にバランス能力は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動作によって実現される[1]。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歩行運動、または移動運動を伴わない身体動作を対象としており、人工物の移動手段による他動的な移動運動の下でのバランス能力についての考察はない。また、3つの感覚を効果的に計測する議論は見当たらない。

2. 研究の目的

人間のバランス能力は、視覚、体性感覚、前庭感覚の感覚統合に基づいている。本研究の目的は、人工物の移動手段を利用した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。本モデルの特徴は、他動的移動運動において、三つの感覚とバランス能力を計測可能な物理量で表現することにある。これらの計測には、研究代表者が開発した立ち乗り型のPMD(Personal Mobility Device、図1)や電動車いすを利用し、被験者の各種物理量の計測法を開発する。



図1 開発したPMD

3. 研究の方法

本研究は、人工物による他動的移動運動における、視覚、体性感覚、前庭感覚を定量表現するために、3つの感覚を表現する方法を考える。その検討に基づき、主観的な速度と人工物の速度の関係性を明らかにし、主観的移動感覚モデルを見出す。また、静的バランス能力と他動的移動運動における人のバランス能力の関係を明らかにし定量的に表す。研究テーマは次の(1)～(3)である。

(1) 感覚情報の定量表現法

他動運動における、搭乗者が感じる主観的な移動速度は、搭乗者が感じる視線の高さが影響していると考えられる。歩行時の視線の高さとPMD乗車時では視線の高さが、当然ながら異なる。この高さの違いは、主に視覚によって知覚される。そのため、ここでは地面からの高さ(PMDの搭乗高さを想定)を変化させたときの、視覚によって搭乗者が感じる主観的な高さ、実際の物理的な高さとの関係について調べた。

10名の被験者(20代男女)の協力のもと実験を行った。厚さ18.5mmの板を10枚用意し、板の枚数ランダムに変更してその上に起立し、被験者が感じる高さをcm単位で回答する。このとき、足元の板の枚数を確認できなくし、周囲の視覚情報のみによって主観的な高さを回答することを目的とした視覚の統制を行った。この統制のために、被験者の視界を遮る板を被験者に所持させ、足元を直接確認できない状態にした(図2)。



図2 実験の様子

異なる高さの板の上に乗る方法として、床面に起立した状態から板の上に登る方法が挙げられる。この場合、被験者は異なる高さの板の上に登るため、板の枚数が変わるたびに、異なる体性感覚を得る。人は、日常生活における階段の上り下りなどを通して、体験的に体性感覚と段差高の関係を取得している。そのため、主観的な高さには、体性感覚の影響も含まれる。したがって、本実験では、この体性感覚の影響を除去するために、次の方法を採用した。被験者は椅子に着席し、脚も座面の上に乗せる(いわゆる体育座りの姿勢)。このとき、ランダムに変更する板の高さと、座面の高さの差が常に一定になるように座面の高さを調整する。その後、被験者は実験実施者の合図によって、足を板の上に置き、椅子から立ち上がり起立する。起立後、この時の主観的な高さを回答し、その後、椅子に体育座りの姿勢で着席する。そして、板の高さを変更し、同様の手順を繰り返す。これにより、ランダムに板の高さを変更しても、座面との相対高さは不変なため、被験者が起立動作によって感じる体性感覚は、板の高さによらず、常に一定となる。

以上の方法で、板の枚数が1～10枚の全ての場合において、それぞれ10回試行を繰り返した。そして、高さごとに被験者が回答した主観的な高さの平均を算出し、実際の物理的な高さとの関連性を見出した。

(2) 主観的移動感覚モデル

他動的移動運動における感覚情報である体性感覚と前庭感覚と視覚情報から人が感じる主観的な速度(主観的移動感覚)と物理速度の関係性を求めた。ここではStevensが提案したマグニチュード推定法[2]を用いて、速度に対する心理量を導いた。マグ

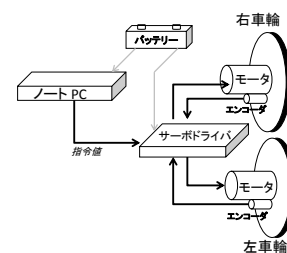


図3 台車のシステム構成

ニチュード推定法では、ある物理強度を標準と定め、その物理強度に係数と呼ばれる数値を当てはめ、被験者に物理刺激を提示し、被験者が標準との比較で感覚的な刺激の大きさを数値で回答する。本実験では、移動台車(電動車いす)に着座した被験者に対して、前進速度 0.8[m/s] を標準の物理強度として提示し、係数に 50 を定めた。被験者は移動台車に着座し、標準速度で 5 秒間走行した。そして、移動台車に着座したまま、ランダムに 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 1.2, 1.4[m/s] の速度でそれぞれ 5 秒間走行した。ランダムに提示された速度毎に、被験者に対し、標準物理用を 50 としたときの心理量を問診した。この実験で用いる移動台車のシステム構成を図 3 に示す。PC から送信された指令速度に基づき、サーボドライバが左右車輪の角速度を PID 制御により制御する。実験は、5 人の被験者(20 代男性)に協力を得て、建物内の廊下で行った。

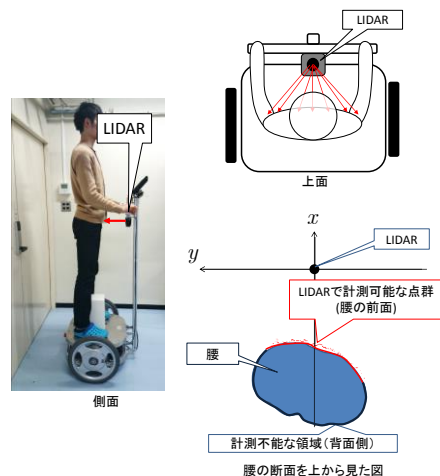


図 4 Lidar の取り付け位置と計測可能領域

(3) 動的バランス能力の定量的表現法

バランス能力は、姿勢を維持することと捕らえることができる。したがって、バランス能力を評価する場合、姿勢の維持度合いを定量化することが求められる。そのため、まずは、姿勢の維持度合いを計測する手法を検討する必要がある。この目的のため、他動運動における起立状態での身体動作の表現法と身体動作のモデル化、また、着座状態における身体動作のモデル化を行った。次にそれぞれの場合を示す。

① 起立状態における他動運動による身体動作の表現法

動的バランス能力の定量的表現法の検討について取り組んだ。そのために、他動運動を人に与える人工物として、PMD を具体的な例題に取り上げ、これに乗車時の身体動揺の計測と定量表現について検討を行った。このときの身体動揺は、無拘束、非接触に計測することが望ましいため、LIDAR (Light Detection and Ranging) を PMD のハンドルポストに取り付け、腰の輪郭を計測した(図 4)。LIDAR の計測データは点群データ(図 4 右下)である。この点群データから、身体運動の中心である腰の位置と姿勢を取得し身体運動を表現する方法を考えた。図 4 の右下が示すように、腰の前面部分(赤い点群)は LIDAR で測定できているが、腰の後ろは測定不可能なため、点群がなく、腰の全周にわたる輪郭を取得できない。したがって、不完全な腰の輪郭から、腰の位置と姿勢を取得することが求められる。そのため、何らかの推定あるいは近似手法を用いなければならない。その方法の候補として、点群データのある曲線へ当てはめ、その曲線のパラメータから腰の位置と姿勢の運動を表現することが考えられる。具体的には、次の 2 つの方法が考えられる。

- ・ 直線近似: LIDAR で計測できる腰の前面の輪郭をおおよそ直線とみなして、最小二乗法による直線近似を行い、直線の傾き a を腰の姿勢、点群の重心 P_g を腰の位置とする(図 5)。
- ・ 楕円近似: 腰の断面形状は楕円であるため、測定点群を最小二乗法により楕円近似し、楕円の偏角を求めることで、腰の姿勢角を、楕円の中心を腰の位置として推定する(図 6)

直線近似は、得られている腰の前面の輪郭だけで腰の動きを求める。一方、楕円近似は、計測できる前面の輪郭から、腰の断面形状を推定し、そこから腰の動きを求める。ここでは、実験により、楕円近似、直線近似のどちらの近似方法が、より忠実に腰の動きを推定できるのかを検証した。実験では、腰の動きのリファレンスとして、PMD の後ろから Microsoft KINECT(モーションキャプチャ装置)を用いて、腰の位置と姿勢を測定した。実験手順は次の通りである。

- 被験者は PMD に乗車し、前後に傾ける、左右に傾ける、体をひねる、の 3 つの動作を独立に行う。
- それぞれの動作で、LIDAR による腰の測定と Microsoft KINECT による測定を行う。
- 測定後、LIDAR の計測データを直線近似と楕円近似し、腰の動きを表す 3 つの値(左右の動きと、捻り動作)を導出する。なお、このとき、腰の動作は、初期姿勢からの偏差とした。
- 導出した動作と Microsoft KINECT で計測した腰の動作を比較す

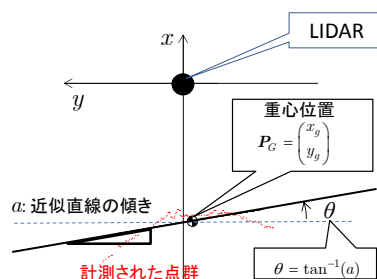


図 5 直線近似の場合

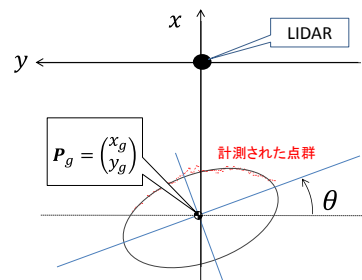


図 6 楕円近似の場合



図 7 身体動作の測定 (LIDAR の設置場所)

る。

②着座状態における他動運動による身体動作モデル

次に着座時の他動運動における人の身体動作モデルを、電動車いすを用いて検討した。被験者を電動車いすに搭乗させ、電動車いすのモータにインパルス状の加速度指令値を与え、電動車いすを静止状態から発進させたときの被験者の上半身の振動を計測した。このときの上半身の動作は①と同様にLIDERを用いた。LIDERを車いすの背もたれ上部に設置し(図7)、搭乗者の背中を測定した後、①の結果を用いて点群を直線近似し、その重心と傾きを用いて身体動作を表した。

③動的バランスと静的バランスの比較

被験者実験を行い、PMD乗車時の身体動揺と、非乗車時のバランス能力(静的バランス能力とする)を比較し、PMD乗車時の動的バランス能力と静的バランス能力の関連性を調べた。静的なバランス能力は、閉眼片足立ちを行った。目を閉じた状態で片足立ちし、片足立ちを保持できる時間を測定した。一方、PMD乗車時の動的バランス能力は、LIDERによる上半身の重心動揺と、搭乗面に設置したフォースプレート(図8)における重心動揺の分散で評価した。このときのPMDの動作は、②の車いすの動作と同様に、インパルス状の加速度を与え生成した。

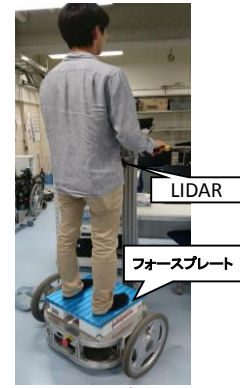


図8 測定装置

4. 研究成果

(1) 感覚情報の定量表現法

視覚による主観的な高さや物理的な高さの関係を実験によって調べた。その結果を図9に示す。この図の実線は、それぞれの高さにおける10人の被験者の10回の試行結果の平均を表す。この図の概形から、実際の高さの増加に対して、主観的な高さの増加傾向が高まっていることが分かる。また、一般的に物理刺激とそれに対する心理量には、ステイブンスのべき乗則[2]の関係があると言われている。これらから、本実験の結果も多項式で近似した。その結果が図9の点線である。以上の結果から、本実験における視覚による主観的な高さは、多項式近似モデルで表現できることが分かった。

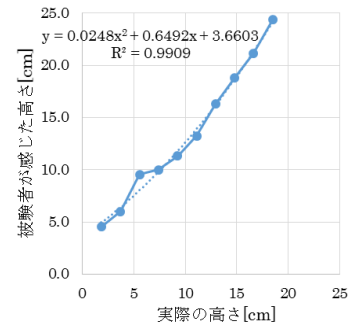


図9 視覚による主観高さモデル

(2) 主観的移動感覚モデル

方法(2)で示した実験の結果を図10に示す。図中の点が、各被験者が回答した速度の感覚量である。この結果を基にして、物理強度と感覚量の関係を見出すために近似曲線を求めた。回帰曲線を数種類用意し、それぞれ回帰分析を行った。その結果は、線形近似:0.876, 対数近似:0.845, 2次多項式0.885, 3次多項式:0.891, 累乗近似:0.808, 指数近似:0.73であった。この結果から、3次多項式近似が適合度が高いことが分かる。図10の中の曲線が3次多項式である。以上から、今回の実験において、実際の速度と被験者が感じる主観的な速度の関係は、物理速度の3次式でモデル化できることが分かった。

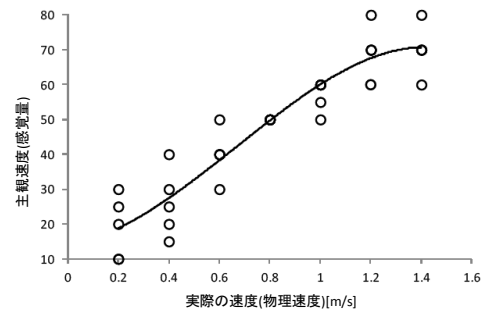


図10 主観的移動感覚モデル

(3) 動的バランス能力の定量的表現法

①起立状態における他動運動による身体動作の表現法

前述の実験方法で得られた結果の一部を(腰の捻り動作)を図11に示す。この図から、直線近似も、楕円近似もおおよそ腰の動きを推定できていることが分かる。左右と前後の動きでも、同様の傾向を得た。したがって、PMD乗車時のLIDERによる身体動作の非接触計測では、測定された点群を直線近似または楕円近似することで、それぞれのパラメータの値から、身体動作を表現できることが分かった。

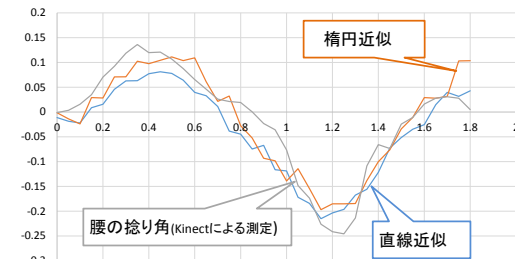


図11 腰の捻りの動作の推定結果

②着座状態における他動運動による身体動作モデル

前述の実験方法で得られた背中中の動きを図12の青線です。このグラフから、他動運動にお

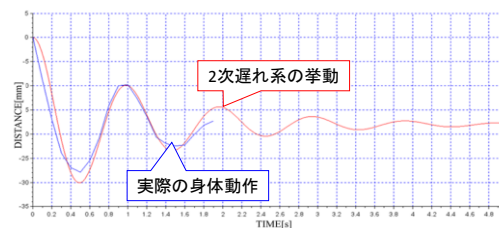


図12 他動運動における身体動作と作成した動作モデル(2次遅れ系)

ける身体動作は、減衰振動であることがわかる。このため、身体動作モデルを図 13 のようなバネ、マス、ダンパ系で表し、その伝達関数を求めた。このときの伝達関数は、2 次遅れ系で表すことができる。この伝達関数のステップ応答を図 12 の赤線に示す。この図が示すように、他動運動における身体動作とほぼ同様の動きであることが分かる。したがって、他動運動における身体動作モデルは、おおよそ、2 次遅れ系で表されることが分かった。

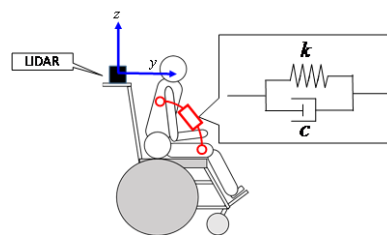


図 13 身体振動モデル

③動的バランスと静的バランスの比較

静的バランス能力と PMD 乗車時のバランス能力の結果について Pearson の相関係数を算出した。その結果、静的バランス能力の間に相関が認められた。また、被験者の学習効果によりバランス能力が向上することが観察された。ただし、本実験の限界として、PM の動作は、インパルス状に加速度を与え、停止状態から直進する場合のみで行ったため、さまざまな PM の動きに対して同様の傾向が得られるかは断言できない。

(4)まとめ

本研究の成果として次の知見が得られた。主観的な速度と実速度の関係は、線形ではなく、3 次多項式で表現される傾向がある。着座型の PMD 乗車時の身体動作モデルは、おおよそ 2 次遅れ系で表すことができる。立ち乗り型の PMD の発進時における人の動的バランス能力は、静的なバランス能力と相関がある。

<引用文献>

- [1] 福井 勉, “姿勢保持とバイオメカニクス”, 総合リハビリテーション, Vol. 36, No. 2, pp. 121-125, (2008.2)
- [2] S. S. Stevens : “Psychophysics: Introduction to Its Perceptual, Neural, and Social Prospects”, John Wiley and Sons, (1975).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

- ① Yusuke Arai, Sho Yokota, Kazuaki Yamada, Akihiro Matsumoto, Hiroshi Hashimoto, Daisuke Chugo, “Robot Shape Design to Easily Recognize Robots’ Movement for Human,” 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society(査読付き国際会議), October 21-23, 2018, pp. 4306 - 4311.
- ② 野澤正紘, 横田祥, 松元明弘, 中後大輔, 橋本洋志, “歩行支援機能付きパーソナルモビリティの開発 第 3 報:歩行アシストモードにおけるアシスト手法の提案,” 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(CD-ROM), 19th, 2018 年 12 月 13 日.
- ③ Sho Yokota, Hiroshi Hashimoto, Daisuke Chugo, Akihiro Matsumoto, “Modeling of human body movement on personal mobility interface using LIDAR,” IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (査読付き国際会議), ICPS 2018, Saint Petersburg, Russia, May 15-18, 2018, pp. 585 - 590
- ④ Chaloom Thammachart, Sho Yokota, Daisuke Chugo, Hiroshi Hashimoto, “Oscillation Suppression Control for Electric wheelchair using Human Body Motion Interface,” the 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2018) (査読付き国際学会), 2018 年 2 月, pp. 1991-1996.
- ⑤ Masahiro Onozawa, Sho Yokota, Daisuke Chugo, Hiroshi Hashimoto, “Personal Mobility with Assistive Walker, - User Interface Design for Vehicle Mode -,” the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, ICINCO 2017 (査読付き国際学会), July 26-28, 2017, Madrid, Spain, Volume 2, pp. 465-470.
- ⑥ Sho Yokota, Daisuke Chugo, Hiroshi Hashimoto, “Study on play specific to the saddle type interface for personal mobility,” IEEE 10th International Conference on Human System Interactions (HSI2017) (査読付き国際学会), July, 2017, pp. 284 - 289.
- ⑦ Sho Yokota, Daisuke Chugo, Hiroshi Hashimoto, Kuniaki Kawabata, “Design of Play Specific to the Saddle Type Interface and Its Implementation,” 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (査読付き国際学会), New York, USA, 2016, Augsut 29-31, pp. 911-912.
- ⑧ Sho Yokota, Daisuke Chugo, Hiroshi Hashimoto, Kuniaki Kawabata, “Contactless Measurement of Human Motion for Personal Mobility Interface,” the 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2016) (査読付き国際学会), 2016, Santa Clara, USA, June 8-10, pp. 296-300.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

特記事項なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者：なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。