

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23650409

研究課題名(和文)音フィードバックによる高度な姿勢制御スキル獲得のための学習支援システムの開発

研究課題名(英文)Development of a skill learning system for advanced body balance control by sound feedback

研究代表者

山際 伸一 (YAMAGIWA, SHINICHI)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：10574725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：身体運動をデータ化できる時代が到来している。本研究はそれらのデータを音に変換して、フィードバックすることで身体バランスを制御することができるかについて挑戦的な研究を実施した。聴覚と身体バランスの潜在的な関係性を、実験を通して解明を試みるとともに、加速度センサデータを音にリアルタイムに変換するシステムを開発し、その有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：A new era has come when body control is captured by a small sensor. This research promoted a challenging research theme that investigates if sound feedback can control body balance or not. This research challenged to find the potential relationship of human between the auditory and the body balance experimentally. The research developed a system that translates data from accelerometer to the feedback sound, and then evaluated the validity of the system.

研究分野：健康・スポーツ科学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学

キーワード：運動とトレーニング センサ 聴覚 フィードバック

1. 研究開始当初の背景

高度に集積された、加速度・地磁気・ジャイロといったセンサによりヒトの行動を多角的にミリ秒間隔で記録する手のひらサイズのシステムを開発できる時代が到来した。そのセンサをヒトが装着し、得たデータをフィードバックして次の動作につなげる可能性がある。本研究では音刺激がヒトの運動制御に及ぼす影響に着目しセンサ出力を音へと変換しフィードバックすることで身体バランスを制御できるかを解明する。その制御可能性として、ヒトの持つ潜在的な運動能力への音刺激による制御と、音刺激の学習により音を頼りに制御する、という2つの方法が考えられ、柔軟性のある高性能センサシステム開発を中心に、実験を行い、その原理・仕組みを探求する。

ナノテクの発展によるセンサの極小化が進む

微細加工技術、特に、マイクロマシン技術が発達し、加速度、ジャイロ、地磁気といったヒトの行動を観測する上で重要な方向・移動スピード、姿勢を観測できるセンサが指先程度の大きさのLSIに詰め込むことが出来る時代が到来し、その利用方法をセンサLSIメーカーは模索している。

センサを装着でき、データをリアルタイムにフィードバックできる時代が到来

最も有望視されている利用方法は超小型センサを持ち歩き、センサから得られたデータをヒトにフィードバックし、次の行動へ反映させる技術の開発である。センサが小型になり、常に持ち歩くことが出来るため、ヘルスケア、スポーツトレーニングやリハビリへの応用が期待される。

従来からのスポーツトレーニングやリハビリへのフィードバック技法には問題がある

従来からフィードバックして次の動作に結びつける技術はある。例えば、筋肉への直接電気刺激で制御する、前庭電気刺激で平衡感覚を制御する(前田ほか, バイオメカニズム学会誌 Vol. 31, No. 2, 2007)といった方法であるが、特に後者は長期的な身体影響への危惧、知覚までの潜時が長い、前後・左右といった大まかな制御しかできないといった問題があり、実用化が難しい。

本研究に関連する先行研究として、前庭電気刺激による身体バランス制御があげられ、直接電気刺激は身体バランスに影響を与えることは可能であることは知られている。しかし、安全面をどんなに証明しても、電気直接刺激に対しての倫理的な違和感やリハビリ中の患者やスポーツアスリートへの不安感となり、科学的にはすばらしい成果だが、利用度を高くするに至っていない。また、Walk-Mate (Miyake, IEEE Trans. on Robotics, 2009) のような難病患者の聴覚へのリズム入力による治療方法も提案され、効

果的である結果が示されている。しかし、単純な聴覚刺激で健常者の身体バランスを制御することが基礎研究のレベルで試行されている (Väljamäe, Brain research reviews, 61(2), 2009) が、加速度センサのデータを音に変換しフィードバックすることで、次の動作を潜在的な運動能力から誘導する試みは未だない。

視覚フィードバックによる錯覚で身体バランスの制御は多く試行されている (Warren, et. al., J Exp Psychol Hum Percept Perform, 22(4), 1996)。しかし、音声によるものは未だ謎が多く、解明されていないことが多い。本研究により発見されるだろうヒトの運動からの聴覚フィードバックによる潜在運動能力への影響は、新たな身体制御理論を発展させるチャレンジである。

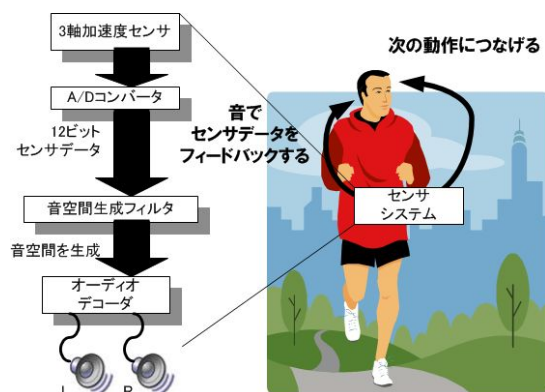


図1: 本研究のねらい
センサデータの音フィードバック

2. 研究の目的

(1) 研究のねらい

そこで、本研究では図1のように加速度センサデータを音に変換し、フィードバックすることで身体バランスを制御できるか? という命題に挑戦する。つまり、運動に伴う音フィードバックで、以下の2つの疑問について、その事実を探求する。

潜在的な運動能力へ影響を与えられるか?

音刺激の学習によって身体制御が可能か?

という2つのテーマを設定し、その事実が存在するかを探求する。具体的にはセンサデータを音へ高速変換し、音の種類も変更できるセンサシステムの開発を中心にして、実験をもとに解明していく。

(2) 本研究で探求する新たな原理

本研究で考慮する聴覚を使った姿勢制御の方法は2つある。1つ目は、ヒトの潜在運動能力に訴える手法であり、反射に訴え、錯覚を誘導する方法である。例えば直進しているヒトの右耳に音を入力すると左右どちらかに曲がる、といった効果が得られることを期待する。この原理が発見できると、音をフィードバックするリハビリシステムへの技術が飛躍的に向上する。2つ目は、ヒトが意識して音に追従する手法である。この方法で

は、意識的に音源を追従するように被験者に学習させ、センサデータの音への変換により、次の姿勢が指示され、再帰的に身体バランスを制御する。以上の2つの方法論から、以下の原理が期待される。

(新原理1) 音フィードバックによる聴覚刺激はヒトの潜在的運動能力に影響を被る

(新原理2) 音を追従する学習によって身体バランスを制御することができる

これら2つの原理が相まって、さらに学習が高度に進んだときの身体への変化を読み取るのが本研究の目的である。

(3) 期待する成果

本研究が追う最大の真理は(新原理1)ではあるが、たとえそれを発見できなくても、(新原理2)に従って以下のような成果が得られることを期待する。

人体への直接刺激のないリハビリテーションシステムを開発できる

電極など人体に直接装着する器具が不要なリハビリシステムを期待できる。小さなセンサシステムを体に装着し、音を聞くだけで診療プログラムを受けられ、家庭での治療が可能になる。

高齢者の転倒などの危険に対する回避システムができる

音フィードバックの直前でセンサデータパターンを解析し、高齢者の転倒パターンに合致する場合には、音声で姿勢修正警告を出力する、事前の危険回避システムへと応用できる。

スポーツのトレーニングへの応用を期待できる

アスリートの動作の癖や姿勢をリアルタイムなセンサデータを使って修正するシステムが出来る。また、(新原理2)を使って、理想のフォームへ近づける応用も考えられ、トップアスリートのデータを使って、小中学生がまねをしながら競技力向上する時代の到来が期待される。

全盲および弱視の障害者に対するアシストシステムが開発できる

ステレオカメラなどの映像入力を加速度センサのデータと統合することで、盲・弱視障害者の行動範囲を広げるアシストシステムが開発できる。例えば足元の段差を音で通知し危険を回避する。

「音ゲー」と呼ばれるエンターテインメントへの応用ができる

音で遊ぶゲームに応用することができ、エンターテインメント産業に利用できる。

3. 研究の方法

本研究は平成23年度～平成25年度の3年間で実施された。本研究は以下の3つのテーマに分割し実施した。

(大テーマ1) 潜在的運動能力への聴覚刺激をつかった基礎実験(12ヶ月)

(大テーマ2) 音フィードバックを実現するセンサシステムの開発(12ヶ月)

(大テーマ3) 音フィードバックを利用し

た運動能力学習実験(12ヶ月)

1つ目のテーマを平成23年度に12ヶ月割り当て、基礎的な知見を得るための実験と原理の解明を行った。また、2つ目のテーマは、前半のテーマの結果に左右されるが、平成24年度に12ヶ月で行った。1つ目のテーマで得られた基礎的な知見を反映したセンサシステムを開発し、実際に音フィードバックの影響をリアルタイムに観測した。最後のテーマは平成25年度に12ヶ月を予定し、前の2つのテーマの成果をもとに学習の効果を研究した。これら3つのテーマは健常者と盲学校からの被験者の協力を要請し、ヒアリングを元に、知見を収集した。

<研究組織体制>

本研究の作業分担としては、工学・視覚・聴覚・心理・脳科学の5つの分野の専門家からなる研究チームを組織した。挑戦的なテーマを設定する性格上、全ての分野で期待した成果を得るのは難しいかもしれないが、多分野・異視点から最大の成果を狙うことに注力した。

上記3つの大テーマを分割した部分を担当する研究組織を作業の概要と共に以下に示す。

図2はその関係図であり、相互の情報交換の関係と協力体制を表す。

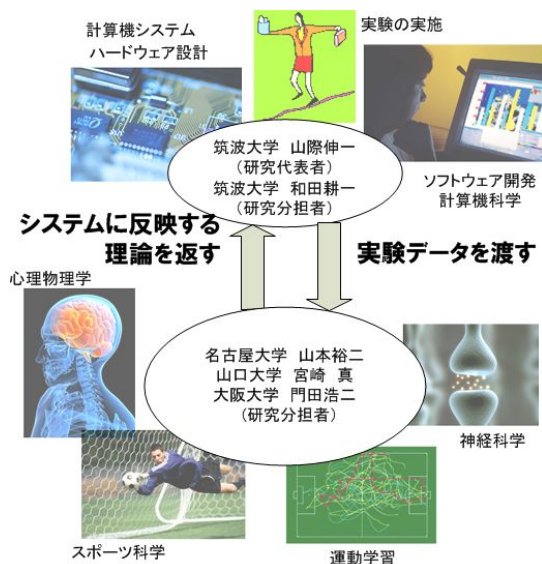


図2: 研究組織体制

計算機システム・ソフトウェア・スポーツ科学分野

- (センサシステムの開発、実験、データ解析)
- ・筑波大学システム情報系 准教授 山際伸一(研究代表者)
- ・筑波大学システム情報系 教授 和田耕一(研究分担者)

が担当し、工学面でのサポートを全て行う。実験から得られた現象の解析や原理の判定等の方法的アプローチの知見を充実させ

るために、本研究には下記の神経科学、心理物理学、認知科学、スポーツ科学からの専門家を研究分担・協力者として含め、運動と聴覚の関係および、実験的なアプローチでの原理証明を狙った。

運動学習・神経科学・心理物理学・スポーツ科学分野

(聴覚刺激の運動への影響のデータ解析と分析)

・名古屋大学 総合保健体育科学センター 体育科学部 教授 山本裕二 (研究分担者)

・山口大学 時間学研究所 教授 宮崎真 (研究分担者)

・大阪大学 医学研究科 助教 門田浩二 (研究分担者)

以上3名は、身体を対象とする実験を基に原理原則を捉えるスペシャリストであり、本研究の遂行のための助言を担当した。以上2チームでの連携を行い、本挑戦的テーマに理論と実装を与えることを目標とした。

本研究が探究する真理としては、(真理1)聴覚刺激が潜在的な運動能力に応じ身体バランスに与える影響と、(真理2)音空間に現れる音源を追従することで身体バランスを制御できる可能性、であり、センサデータのリアルタイムな音フィードバックにより、それぞれを実験的に証明していく。(真理1)に関しては、左右の音空間だけを刺激の対象にし、直立と直進による影響を観測する(図3(a))。直立姿勢でのバランス誘導と、直線上を音刺激と共に移動した際に、左右の「ぶれ」を音フィードバックにより補正を試みる。この実験結果の差を全盲者と晴眼者との間で検証し、視覚の影響を議論する。補正の精度を数値的に検証し、(真理1)を結論づける。

(真理2)の検証では、3次元の音空間を構成し、被験者に実験の前に音空間で移動する音源を追うことを学習させ、直立の場合のバランス誘導と、音源追従による自由移動での位置誘導(図3(b))を試みる。位置誘導の実験において最終的に期待した場所からのずれを計測し、音源を追従する方法の精度を導く。さらに実験の様子を収めた映像と移動中のフィードバック音とを比較し、その精度を検討し、全盲者と晴眼者との間での差も解析する。以上から、(真理1)が実証できない場合、(真理2)が身体バランスを制御する方法であり、音フィードバックの学習の進度が議論の対象になる。一方、(真理1)を実証できる場合は、(真理2)の方法をアシストするために、BGMとして、(真理1)の聴覚刺激を聞きながら、(真理2)の方法で重心を誘導する高精度なシステム開発が可能である。これらの解析結果をセンサシステムの音空間生成ソフトウェアに組み込み、リアルタイムに音フィードバックが可能で、さら

に、携帯できるサイズのシステムを開発する。

各実施年度での計画は以下のようにした。
<平成23年度計画>

(大テーマ1)は下2つの小テーマに分割する。

(小テーマ1)制御可能な音刺激システムの作成

(小テーマ2)音フィードバックの影響を観察する実験

(小テーマ1)は、未使用のノートパソコンなどを再利用し、ソフトウェアによって生成された音刺激を左右のヘッドホンから出力するシステムを開発し、(大テーマ2)のための実験プランを立てる。期間としては8ヶ月を割り当てる。(小テーマ2)に関しては、高知県内の盲学校からの全盲者と、研究室学生などの晴眼者に協力を要請し、実験を実施し、データを収集する。この期間としては4ヶ月を割り当てる。この収集したデータについて、スポーツ科学分野の分担者・協力者に見解を依頼する。この見解をもとに、(大テーマ2)への実装方法を検討し次年度につなげる。

<平成24年度、平成25年度計画>

(大テーマ2)に掲げたセンサシステムの開発が平成24年度の最大の目標になるが、3つの小テーマに分け実施していく。(小テーマ3)フィードバック音の選定と実験による評価は(大テーマ1)からの検討を基に音の出力パターンを作成し再実験を行う。4ヶ月の期間を計画する。(小テーマ4)センサシステムの開発はハードウェアとソフトウェアを開発する期間であり6ヶ月を要する。最後の2ヶ月間で、(小テーマ5)音声フィードバックを用いた評価実験で、開発したセンサシステムを使って(大テーマ1)と同じ方法で評価実験を行い、理論の正しさを検討する。平成25年度は学習の実験に十分に時間をかけ、センサシステムのソフトウェアを改良しながら学習の効果を検証し、最後に全体を総括する。

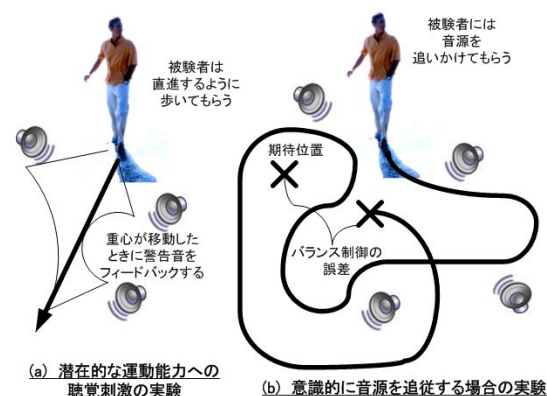


図3:本研究での実験方法

4. 研究成果

本研究によって得られた成果については、(1)聴覚に対する身体バランス制御の人の基礎的な運動能力と、(2)音声をフィード

バックした場合の運動学習、および、身体バランス制御、に分類でき、それぞれに関して以下で説明する。

音による人の潜在的な身体バランス制御能力は発見できなかった。

健常者と全盲者の協力により、図3(a)に示した実験を行った。フォースプレート上に直立し、ヘッドホンから出力される440 Hzの音声を聞くことで、聴覚刺激を与えた場合、バランスが崩れるかを実験した。しかし、健常者、全盲者(含、先天盲)ともに、聴覚刺激に対しては、身体バランスの崩れがなく、つまり、潜在的な音による誘導はできなかった。

音による誘導によって身体バランス制御の制御量が、その音の変化の種類によって異なることを発見した。

音による身体バランス制御の潜在的な能力による誘導は上記の通り不可能であったが、音刺激を意識的に追いかける図3(b)についての実験も行った結果、左右に変化する音の変化に従って、歩行進行方向を追従させる場合、音の変化方法によって、進行方向転換の回転量が異なることを発見した。この実験では、音刺激を左右にパンを変化させ、それを追従する実験を行い、その変化の仕方については、シグモイド関数とヘビサイド関数に分け、それらをランダムに実験参加者に提示した。その際、シグモイド関数を使った音変化の場合(つまり、緩やかに音が左右で移動する場合)に比べ、ヘビサイド関数を使った場合(矩形で音が左右で変化する場合)のほうが、身体の回転量が多いことがわかった。これは、音声を追いかけるようにガイドするようなアプリケーション(例えばリハビリなど)で、体の回転量を制御したい場合に、ヘビサイド関数でのパンの変更をすることで、多く体を動かすように誘導する、といった応用が可能になると期待できる。

音による身体バランス制御は視覚に関わることを発見した。

上述の図3(b)に関わる実験の中で、晴眼者に対しては、アイマスクを使って条件をそろえていた。本成果ではこのアイマスクがない場合、つまり、晴眼者が視覚を得ている場合について、音を追従すると同様な実験を行った結果、視覚を生涯のうちに得たことがある実験参加者(晴眼者、後天盲者)については、音刺激に対する反応時間が、短いことを発見した。つまり、聴覚刺激によるバランス制御は視覚情報にも関連していて、視覚情報が助けることで、高速な反応ができていたことが明らかになった。

音による運動学習能力は発見できなかった。

音によって運動を学習する、つまり、同じ音刺激を得ることで、身体バランス制御の精度を高めることは不可能であることを上述の歩行の実験によって確認した。

(2)音のフィードバックシステムには工学

的な課題があることがわかった。

音を動きのデータ(センサデータ)からフィードバックする試験用のシステムを開発した。図4にその写真を示す。このシステムでは、加速度センサデータを440Hzの音データに変換してイヤホンに音として出力することができる。しかし、このシステムを使ったフィードバック実験を行ったところ、大きく2つの問題点が露呈した。1つ目は、センサデータから音データに変換するディレイが現代の組み込みシステムの技術(つまり、ソフトウェア処理)では大変違和感のある遅延が避けられないことがわかり、動きを先見する必要があることがわかった。しかし、まだ発生していない動きに対し、そのデータを予見して作り出すことは不可能であるので、やはり、高速にリアルタイムなデータ変換ができる演算処理能力をもった計算技術の開発が今後必要である。



図4:音フィードバック機能付実験システム

2つ目は運動を制御するためのフィードバックタイミングの決定は不可能であることがわかった。この結論に至るに際し、以下のようなフィードバックに関する議論をした。定期的なタイミングで出力されるガイド音に従い運動をする場合を考える。このとき、ガイド音に対し、運動による身体バランス制御タイミングがずれる場合、それを補正しようとするタイミングでフィードバックされたガイド音のタイミングを決定し、音を出力する場合を考える。このフィードバックの種類には、ポジティブフィードバックとネガティブフィードバックがある。ポジティブフィードバックでは、例えば、音の出力に対してバランス制御が早まった場合、次回のガイド音の出力タイミングを遅らせる方式である(図5(a))。ネガティブフィードバックはその逆で、バランス制御が早まった場合、次回のガイド音の出力タイミングを早める方式である(図5(b))。この2つの方式を用いない場合はフィードバックのない定常的なタイミングを出力する場合になる。

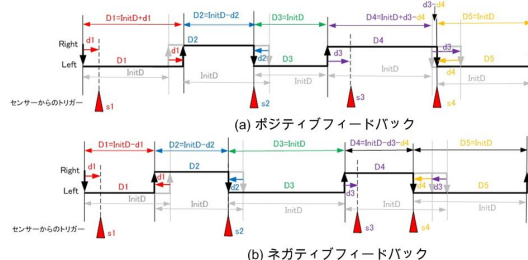


図5:フィードバック方式

ポジティブフィードバックとネガティブフィードバックに関して、タイミング提示を音で行うテストシステムをスマートフォンに開発し、実験した。ポジティブフィードバックの場合、遅れが累積し、どんどん遅れてしまう傾向を示し、ネガティブフィードバックはどんどん早まってしまう傾向にあるため、正しいテンポを見失う。このとき、人が暗黙に刻むテンポに対し影響を受けることはわかったが、そのテンポを「正しい」テンポに戻すためには、新たなリズム感に関する知見が必要ではあるが、本研究期間では探求を実施することはできなかった。

以上から、工学的な知見と、認知実験からの知見によって、音によるフィードバックで身体バランス制御をすることはできなかったということに結論づける。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計2件)

Shinichi Yamagiwa, Naka Gotoda and Yuji Yamamoto, Space Perception by Acoustic Cues Influences Auditory-induced Body Balance Control, icSports: International Congress on Sports Science Research and Technology Sports 2013, 20 September 2013, Portugal

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山際 伸一 (YAMAGIWA Shinichi)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号：10574725

(2) 研究分担者

福本 昌弘 (FUKUMOTO Masahiro)
高知工科大学・工学部・教授
研究者番号：70299387

山本 裕二 (YAMAMOTO Yuji)
名古屋大学・総合保健体育科学センター・教授
研究者番号：30191456

和田 耕一 (WADA Koichi)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号：30175145

宮崎 真 (MIYAZAKI Makoto)
山口大学・時間学研究所・教授
研究者番号：30392202

市川 浩 (ICHIKAWA Hiroshi)

福岡大学・スポーツ科学部・助教
研究者番号：20375463

門田 浩二 (KADOTA Koji)
大阪大学・医学(系)研究科(研究院)・助教
研究者番号：50557220