

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2012

課題番号：23650097

研究課題名（和文）カエルの合唱モデルを用いた人と合奏協調する音楽共演者ロボット

研究課題名（英文）Music Co-player Robot that plays ensemble with people based on the frog's chorus

研究代表者

奥乃 博 (OKUNO HIROSHI G.)

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号：60318201

研究成果の概要（和文）：①ギター演奏の手の動きとギター演奏音響信号との情報統合と、複数の追跡機構の結果統合による裏拍等に頑健なビート追跡法を開発し、音楽共演者ロボットを開発。②カエルの合唱でのリーダーに倣ったリーダー度を設計し、実時間でリーダー度を求め、リーダー度が最も高いパートに演奏を合わせる合奏機構を開発し、音楽共演ロボットで有効性を確認。③2種の信号帯域に応答する音光変換装置「カエルホタル」の開発し、2種類のカエルの合唱の同時観測に日豪で成功。

研究成果の概要（英文）：(1) Beat-tracking is developed by integrating information of hand's movement and audio signals and by combing results of multiple beat-tracking method. The method makes music co-player more robust against various beat-patterns. (2) The leadership of ensemble is designed based on the observation of frog chorus. The music co-player robot computes the leadership in real-time, and follows the part of the highest leadership. (3) Firefly that responds two kinds of bandwidth of audio signals to light different LEDs is developed and its deployment to fields in Oki Island and in Australia confirms that it can demonstrate the calling patterns of two kinds of frogs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：知能ロボティクス，カエルの合唱モデル，音楽共演者ロボット，音楽合奏協調，テルミン演奏ロボット，ノンパラメトリックベイズ，楽譜追跡，カエルホタル

1. 研究開始当初の背景

音楽は、年齢差・言語・文化を超えて、音声よりも濃いインタラクションが可能である。特に、人とロボットとの共生では、音楽共演者ロボットへの期待が高い。研究開始当初は以下のような問題があった。

- (1) ロボット自身の耳で聞くロボット聴覚の観点から、演奏を聞いてリズムや音楽特徴を認識する音楽ロボットは未開発。
- (2) インタラクションする音楽ロボットの多くは、音響信号ではなく MIDI 入

力からの特徴抽出に留まっている。

- (3) 合奏の協調機能として、リズム・メロディレベルでの同期に基づくものはあるものの、生物の合唱を対象にした数理モデルによる創発的同期は未開発。
- (4) フィールドでのカエルの合唱の観測のためのマイクロフォンアレイ音響処理は端緒についたばかりで、対象種のカエルだけでなく、多種のカエルや他生物の鳴き声、環境音が入り、対象とする鳴き声を観測するのが難しい。

2. 研究の目的

本研究では、人どうしで見られる自然な合奏を実現するために、カエルの合唱機構の解明を通じた、創発的な音楽ロボットと人との合奏協調機構を有する音楽共演者ロボットを開発する。具体的には次の2点に絞る。

(1) 【共演者ロボット要素技術の開発】

- ① 自分の耳で聞いた混合音から相手の演奏だけを分離し、
- ② 分離音から実時間でビート追跡、楽譜追跡を行い、演奏タイミングを予測。

(2) 【共演者ロボット合奏協調機構の開発】

- ③ フィールドでのカエルの配置がカエルの合唱に及ぼす影響の観測を通じて、
- ④ リズム、メロディレベルでの演奏同期、演奏中の同期のずれを結合型非線形振動子アトラクタにより解消し、提案合奏協調手法の有効性を実証。

3. 研究の方法

(1) テルミン演奏ロボットの高性能化

(2) 【共演者ロボット要素技術の開発】

- ① ビート追跡の視聴覚情報統合、結果統合、楽譜追跡・予測の確率的手法による高性能化・実時間化。
- ② ギター演奏での多様なビートパターン、特に裏拍、に頑健なビート追跡、楽譜追跡の開発。

(3) 【共演者ロボット合奏協調機構の開発】

- ③ 既開発の音光変換装置「カエルホテル」の国内外でのフィールド実証、2種類の音響信号帯域にตอบสนองするLEDを備えた新「カエルホテル」の開発とソフトウェアの開発、および、フィールドでの実証。
- ④ リズム・メロディレベルでの同期、無音区間での画像による同期、非線形振動子による同期。
- ⑤ カエルの合唱モデルに基づいたリーダー度を用いた合奏の主導権推定モデルによる創発的合奏の実現。

4. 研究成果

(1) テルミン演奏ロボットの高性能化と非線形結合子を用いた合奏モデル

テルミン演奏ロボットの開発では、演奏するロボットが変わっても同じソフトウェア体系で演奏できるシステムを、テルミンの音高モデルを設計し、Unscented Kalman Filter によるパラメータの逐次更新で対応をした。

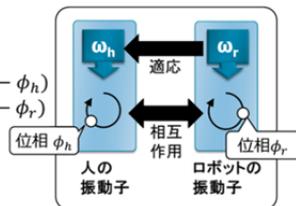
▶ 定式化 (2人合奏に限定)

▶ 位相方程式

$$\begin{cases} d\phi_h/dt = \omega_h + K_h \sin(\phi_r - \phi_h) \\ d\phi_r/dt = \omega_r + K_r \sin(\phi_h - \phi_r) \end{cases}$$

▶ テンポ更新

$$\omega_r \leftarrow \omega_r + \mu(\omega_r - \omega_h)$$

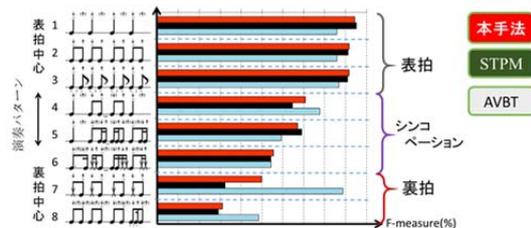


また、カエルの合唱モデルである非線形結合子による合奏モデルを設計し、共演者の拍予測の精度を向上し、シミュレーションと実演層で、本手法の有効性を確認した。



(2) ギター演奏のビート追跡法

ギター演奏音特有のビート追跡での課題は、表拍、シンコペーション、裏拍が混在することによるビートパターンの複雑性にある。ギター奏者の演奏情報として、音響情報、楽譜から得られる和音情報、及び、手の軌跡を使用する。手の軌跡では、手の肌色とギター板面の色と混同するので、RGB-D カメラからの距離情報を使用して、手の位置検出を行う。これらの特徴量と手の軌跡モデルからパーティクルフィルタを用いて、次のビート予測を行う。これにより、裏拍に対する頑健性が増すが、表拍に対する性能は既存手法ほどには高くない。多様なビートパターンに対応するために、複数のビート追跡法を同時に走らせ、それらの信頼度を定義し、信頼度の高いビート予測が可能となった。



本システムは、サンフランシスコでの IROS-2011 ロボットデモセッションで実演を行い、慶応大学での AI チャレンジ研究会でもデモを行い、スーパーサイエンススクール事業でも講演とデモを行い、科学技術理解促進にも努めた。さらに、本成果は、ホンダリサーチインスティテュートジャパン (株) のダンスロボットにも応用され、人のフルート奏者のジェスチャによる開始キュー、テン

ポ変化キュー，フェルマータの停止キューをジェスチャ認識し，ギター奏者のテンポに合わせて，テルミンを演奏し，Vocaloidが歌い，手振りダンスをするロボットにも応用されている。



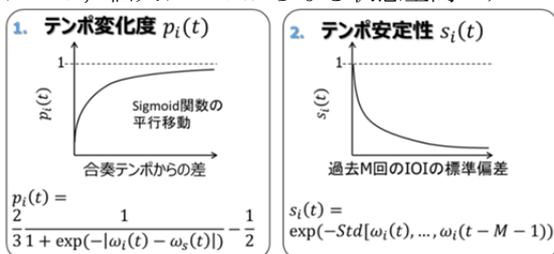
(3) 確率的情報統合による楽譜追跡

楽譜の現在演奏されている位置を同定し，次に演奏される位置を予測する楽譜追跡では，音符長のモデル化，種々の音色に頑健な音響・楽譜間マッチング，および実時間楽譜位置推定が課題である。本研究では，パーティクルフィルタを応用し，音響伸縮アライメントテンポによりテンポを同時に推定し，調波構造マッチングにより音色に頑健な楽譜とのマッチングを行い，パーティクル重み計算の並列化で実時間処理を達成している。楽譜位置誤差の観測分布に従来研究で使用されるKL Divergenceではなく，急峻なピーク分布を表現するポアソン分布を使用し，性能向上を図ることができた。この結果，ギター奏者のテンポ変化にテルミン演奏ロボットがうまく追従することが可能となった。

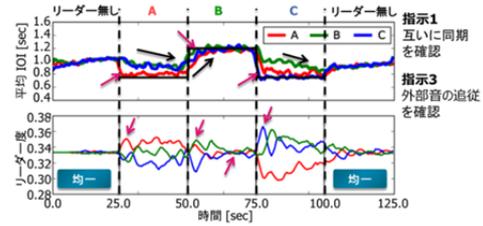


(3) リーダ度による合奏

これまでの音楽合奏は，リーダーが定まっていたのに対して，3人以上の合奏ではリーダーの選択あるいは合奏の主導権の同定と委譲が重要な課題となる。カエルの合唱でもリーダーとなるカエルの鳴きで合唱が始まり，リーダーは時とともに変化する。本研究では，リーダー度を定義し，ロボットが適切なリーダーを検出することで，スムーズな合奏が可能な枠組みを設計した。リーダー度は，テンポ変化度とテンポ安定性との積で定義し，リーダー度，合奏テンポ，個人テンポからなる状態空間モデル



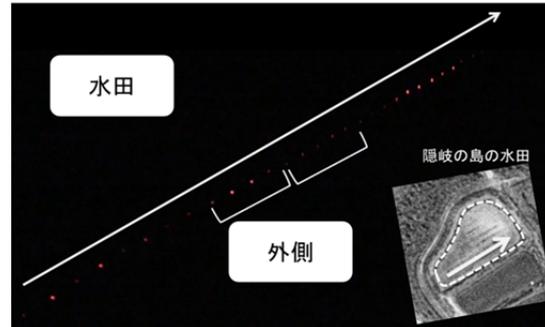
として表現し，テンポと位相の観測モデルを逐次更新することによりリーダー度の変化を追跡する。本手法の有効性をシミュレーションで確認をした。



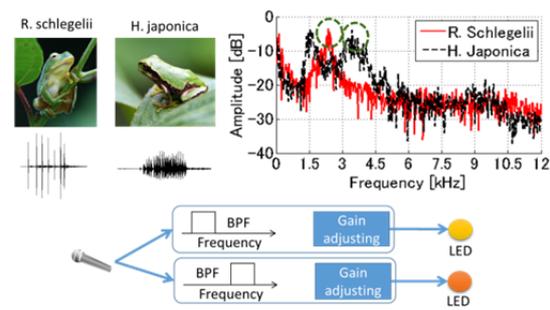
(4) 音光変換装置「カエルホタル」によるフィールドでのカエルの合唱の観測は，既開発の音光変換装置「カエルホタル」は図に示したように近接音に反応してLEDが光る



装置である。本装置を使用し，隠岐の島の田んぼで2年続けてカエルの合唱の観測を行い，画像処理の工夫を行い，田んぼの畦道で同期してカエルが鳴く現象(合唱)を可視化した。下記にその映像を示す。



本システムはカエルホタルの近傍にカエルがいる今年示していないので，正確な観測となっていない可能性がある。たとえば，シュレーグリーとニホンアマガエルは同じ場所に生息することが多いが，鳴き声は下図に示したように前者は特定帯域にピークがあるのに対し，後者は2つピークがあり広帯域に鳴き声が広がっている。この違いを吸収するためにバンドパスフィルタを介してLEDを2種類らせるようにした。この結果，京大農場，隠岐の島，豪州ゴールドコーストで2種類のカエルの合唱を同時に観測することに成功をした。現在，詳細なデータを解析中である。



なお、カエルホタルは、Animal Behaviour 誌 60 周年記念エッセイで、今後の重要な観測装置であるとの期待が述べられている。

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)

[雑誌論文] (計 13 件)

- 1) Takeshi Mizumoto, Ikkju Aihara, Takuma Otsuka, Ryu Takeda, Kazuyuki Aihara, Hiroshi G. Okuno, Sound Imaging of Nocturnal Animal Calls in Their Natural Habita, *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 査読有, Vol.197, 2011, pp.915-921, DOI: 10.1007/s00359-011-0652-7
- 2) リムアンジェリカ, 水本武志, 大塚琢馬, 古谷ルイ賢造, 尾形哲也, 奥乃博, 音楽共演ロボット: 開始・終了キューの画像認識による人間のフルート奏者との実時間同期, *情報処理学会論文誌*, 査読有, 52 巻, 2011, pp.3839-3852. <http://id.nii.ac.jp/1001/00079563/>
- 3) Tatsuhiko Itohara, Takuma Otsuka, Takeshi Mizumoto, Angelica Lim, Tetsuya Ogata, Hiroshi G. Okuno, A multi-modal tempo and beat tracking system based on audio-visual information from live guitar performances, *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, 査読有, Vol.2012, 2012, pp.1-15, DOI: 10.1186/1687-4722-2012-6
- 4) Takeshi Mizumoto, Toru Takahashi, Tetsuya Ogata, Hiroshi G. Okuno, Adaptive Pitch Control for Robot Thereminist using Unscented Kalman Filter, *Modern Advances in Intelligent Systems and Tools, Studies in Computational Intelligence*, 査読有, Vol.431, 2012, pp.19-24, DOI: 10.1007/978-3-642-30732-4_3
- 5) 奥乃博, 中臺一博, 水本武志, 混合音を聞き分けるセンシング技術, *電子情報通信学会学会誌*, 査読無, 95 巻, 2012, pp.401-404. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009445370>
- 6) Tatsuhiko Itohara, Takeshi Mizumoto, Takuma Otsuka, Tetsuya Ogata, Hiroshi G. Okuno, Particle-filter Based Audio-visual Beat-tracking for Music Robot Ensemble with Human Guitarist, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2011)*, 査読有, Vol.1, 2011, pp.118-124. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094773
- 7) Angelica Lim, Tetsuya Ogata, Hiroshi G. Okuno, Converting emotional voice to motion for robot telepresence, *Proceedings of IEEE-RAS Interanational Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2011)*, 査読有, 2011, pp.472-479. DOI: 10.1109/10.1109/Humanoids.2011.6100891
- 8) Takuma Otsuka, Kazuhiro Nakadai, Tetsuya Ogata, Hiroshi G. Okuno, Incremental Bayesian Audio-to-Score Alignment with Flexible Harmonic Structure Models, *Proceedings of 12th International Society for Musical Information Retrieval Conference (ISMIR-2011)*, 査読有, 2011, pp.525-530. <http://ismir2011.ismir.net/papers/PS4-9.pdf>
- 9) Takeshi Mizumoto, Tetsuya Ogata, Hiroshi G. Okuno, Who is the leader in a multiperson ensemble? --Multiperson human-robot ensemble model with leaderness--, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2012)*, 査読有, 2012, pp.1413-1419. DOI: 10.1109/IROS.2012.6385782
- 10) Joao Lobato Oliveira, Gokhan Ince, Keisuke Nakamura, Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno, Luis Paulo Reis, Fabien Gouyon, Live Assessment of Beat Tracking for Robot Audition, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2012)*, 査読有, 2012, pp.922-997. DOI: 10.1109/IROS.2012.6386100
- 11) Ikkju Aihara, Takeshi Mizumoto, Takuma Otsuka, Hiromitsu Awano, Hiroshi G. Okuno, Kazuyuki Aihara, Possible Functions of Call Alternation in Frog Choruses, *Tenth International Congress of Neuroethology*, 査読有, 2012, DOI: 10.3389/conf.fnbeh.2012.27.00267
- 12) Takeshi Mizumoto, Hiromitsu Awano, Ikkju Aihara, Takuma Otsuka, Hiroshi G. Okuno, Sound imaging system for visualizing multiple sound sources from two species, *Tenth International Congress of Neuroethology*, 査読有, 2012, DOI: 10.3389/conf.fnbeh.2012.27.00247
- 13) Tatsuhiko Itohara, Kazuhiro Nakadai, Tetsuya Ogata, Hiroshi G. Okuno, Improvement of Audio-Visual Score Following in Robot Ensemble with Human Guitarist, *Proceedings of IEEE-RAS Interanational Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*, 査読有, 2012

[学会発表] (計 9 件)

- 1) Angelica Lim, Takeshi Mizumoto, Takuma

- Otsuka, Tatsuhiko Itoharu, Kazuhiro Nakadai, Tetsuya Ogata, Hiroshi G. Okuno, More cowbell! A musical ensemble with the NAO thereminist, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2011), 25-30 Sep. 2011 San Francisco, USA.
- 2) 糸原達彦, 水本武志, Angelica Lim, 大塚琢馬, 中村圭佑, 長谷川雄二, 中臺一博, 尾形哲也, 奥乃博, マルチロボットによる Kinect を用いた同期合奏, 第 34 回 AI チャレンジ研究会, 人工知能学会, 2011 年 12 月 15 日, 慶応義塾大学.
 - 3) Angelica Lim, 水本武志, 大塚琢馬, 糸原達彦, 中臺一博, 尾形哲也, 奥乃博, An interactive musical ensemble with the NAO Thereminist, 第 34 回 AI チャレンジ研究会, 人工知能学会, 2011 年 12 月 15 日, 慶応義塾大学.
 - 4) 糸原達彦, 大塚琢馬, 水本武志, 尾形哲也, 奥乃博, パーティクルフィルタを用いたギター演奏の視聴覚統合ビートトラッキング, 日本ロボット学会第 29 回学術講演会, 3A2-2, 2011 年 9 月 9 日, 芝浦工業大学.
 - 5) 糸原達彦, 大塚琢馬, 水本武志, 中臺一博, 尾形哲也, 奥乃博, Kinect による楽器マスキングを用いた視聴覚統合ビートトラッキング, 情報処理学会第 74 回全国大会, 5ZD-1, 2012 年 3 月 8 日, 名古屋工業大学.
 - 6) 水本武志, 尾形哲也, 奥乃博, 人とロボットの合奏のための多人数合奏の主導権推定, 日本ロボット学会第 30 回学術講演会, 2012, 札幌コンベンションセンター.
 - 7) 糸原達彦, 奥乃博, 音楽ロボットとの合奏のための信頼度を用いたビートトラッキングの結合手法, 日本ロボット学会第 30 回学術講演会, 2012, 札幌コンベンションセンター.
 - 8) Hiroshi G. Okuno, Human Robot Interaction through Robot Audition, IEEE/RSJ IROS-2012 Workshop on Motivational Aspect of Robotics in Physical Therapy (招待講演), 2012 年 10 月 12 日, Vilamore, Algarve, Portugal.
 - 9) 糸原達彦, 水本武志, 奥乃博: 音楽ロボットのための複数のビートトラッキングの結合手法とその有効性の検証, 情報処理学会第 75 回全国大会, 4T-4, Mar. 2013. 東北大学.
- [図書] (計 1 件)
- 1) 奥乃博, ロボット聴覚, 日本ロボット学会編『ロボットテクノロジー』, 2011, 304 ページ, オーム社.
- [その他]
- 1) ホームページ等
<http://winnie.kuis.kyoto-u.ac.jp/>
 - 2) 重要な引用
Animal Behaviour 誌 60 周年記念エッセイで, 雑誌論文(1)がカエルの合唱の観測用の重要な新デバイスとして評価.
DOI: 10.1016/j.anbehav.2012.10.031
 - 3) アウトリーチ活動
スーパーサイエンスハイスクール事業サイエンスフォーラム, ロボットの科学フォーラム, 2012 年 7 月 28 日, 奈良市民文化ホール
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
奥乃博 (OKUNO HIROSHI G.)
京都大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号: 6 0 3 1 8 2 0 1
 - (2) 研究分担者
なし
 - (3) 連携研究者
合原 一究 (AIHARA IKKYU)
理化学研究所・脳数理研究チーム・
基礎科学特別研究員
研究者番号: 7 0 5 8 8 5 1 6