

Follow you, follow me: Continuous mutual prediction and adaptation in joint tapping

Konvalinka, I., Vuust, P., Roepstorff, A., & Frith, C. D.

The Quarterly Journal of Experimental Psychology, Vol. 63, No. 11, pp. 2220-2230, 2010

Introduction

- ・ 人間は、目標や意図、行為を調整し、他者との柔軟な協調行動を実現 (Newman-Norlund, Noordzij, Meulenbroek, & Bekkering, 2007)
 - 討論, オーケストラ, タンゴダンス等で観察
 - * 意識的努力をほとんど必要とせず, 素早く他者と協調
- ・ 一方で, 協調行動が確立される「過程」については十分に理解されていない (Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006)
 - millisecond のタイムスケールで, 確立されるメカニズム
- ・ 協調行動として, これまで運動の同期現象が注目されてきた
 - 歩行 (van Ulzen, Lamoth, Daffertshofer, Semin, & Beek, 2008)
 - 姿勢の傾き (Shockley, Santana, & Fowler, 2003)
 - 手・腕のスイング動作 (Mottet, Guiard, Ferrand, & Bootsma, 2001; Schmidt et al., 1990)
- ・ 同期現象には, 安定状態として 2 つのモード (Haken, Kelso, & Bunz, 1985)
 - 同相 (in-phase): 2 つの運動が同タイミングで, 同方向で行われる
 - * 例: 2 者が同じタイミングで膝の屈伸運動を行う
 - 逆相 (anti-phase): 2 つの運動が同タイミングで, 逆方向に行われる
 - * 例: 1 人が膝の屈曲運動を行う一方で, もう 1 人は伸展運動を行う
- ・ 関心としては, 知覚情報に基づき行動が決定するとした場合, 知覚情報と協調行動を確立させる方略との関連
 - 聴覚情報に注目し, 個体間での情報共有のレベルに応じた方略について検討
- ・ 本研究の目的
 - 様々な聴覚フィードバック状況で, 協調行動がどのように確立されるのか検討
 - * ある個人の運動が, 他者の運動をリード (lead) して確立してゆくのか?
 - * 個人間で運動を相互に調整することで確立してゆくのか?

Method

Participants

- ・ 右利きの大学生 32 名が参加
 - 女性 21 名, 男性 11 名
 - * 平均 27.3 才
 - 2 人 1 組のペアをランダムに形成
 - * 参加者 1 と参加者 2 とラベル付け

Materials and apparatus

- ・ 電子キーボードがコンピュータに接続
 - 各参加者は指定されたキーをタッピング
 - * 各参加者のタッピングは全て記録
- ・ コンピュータからメトロノーム音やタップ音が聴覚情報として提示
 - 各参加者はヘッドフォンを装着し, 聴覚情報を受け取る

Task and procedure

- ・ 各参加者は別室で課題を実施
- ・ 96/120/150bpm のテンポをもつメトロノーム音がランダムで提示
 - 各試行において, 始めにメトロノーム音に合わせて, 右手の人差し指でタッピング
 - 8 回分, タッピングを実行
- ・ 8 回分タッピングした後, メトロノーム音が停止
 - その後, (a)~(d) 条件のいずれかで, 32 回分タッピングを実行
 - * (a) コンピュータ条件
 - » 継続して提示されるメトロノーム音
 - * (b) カップリングなし条件
 - » 自身のタップ音
 - * (c) - 1 一方向カップリング A 条件
 - » 参加者 1 のタップ音
 - * (c) - 2 一方向カップリング B 条件
 - » 参加者 2 のタップ音
 - * (d) 双方向カップリング条件
 - » 他者のタップ音

- ・ 計 60 試行実施
 - テンポ 3 種類 (96/120/150bpm) × 5 条件 ((a)/(b)/(c) - 1/(c) - 2/(d)) × 4 試行
- ・ 参加者は，課題遂行にあたって以下の教示を受ける
 - 可能な限り，開始時のメトロノーム音のテンポを維持してタッピング
 - » かつ，(a)～(d) 条件で提示される他者のタップ音やメトロノーム音に合わせてタッピング
 - タッピングを実行する状況
 - » 各試行前に (a)～(d) のどの条件で行うのか

Data analysis

協調行動の方略に関する分析

- ・ ITI (intertap interval) に注目
 - 個人において，タッピングしてから次にタッピングするまでの時間間隔
 - * 相互相関関数から，両参加者による ITI の時系列データの一致度を評価
 - * ITI の時系列データは Fig.1b～e の上段を参照
 - » 96bpm において，(b)～(d) の 4 条件で課題を行った結果
- ・ 両参加者の時系列データについて，6 データポイント分を分析区間
 - 相互相関関数を適用
 - 加えて，6 データポイントを「窓」とし，窓をずらして分析区間を移動
 - * データポイント 1～6 → データポイント 2～7 → データポイント 3～8…
 - * 移動するごとに相互相関関数を適用
- ・ 6 データポイント分の時系列データを対象に，一方の時系列データを 1 データポイントずつずらす
 - ±3 データポイント分ずらした時の一致度を相互相関係数として算出
 - * 今回は，±1 データポイント分ずらした時の相互相関係数を評価
 - » 相互相関係数は，-1～+1 までの値をとる
 - ずらさなかった時の相互相関係数についても算出
- ・ (b)～(d) の 4 条件で，相互相関係数の特徴について検討 (Fig. 1a)
- ・ 相互相関係数から以下の方略が示唆
 - -1 データポイントずらした際，相互相関係数が +1 に近くなる場合
 - * 参加者 1 をフォロワー，参加者 2 をリーダーとする方略

- +1 データポイントずらした際、相互相関係数が+1 に近くなる場合
 - * 参加者 1 をリーダー、参加者 2 をフォロワーとする方略
- データポイントをずらさなかった際、相互相関係数が+1 に近くなる場合
 - * 他者との相互調整による方略
- データポイントをずらさなかった際、相互相関係数が-1 に近くなる場合
 - * 他者との相互関係による方略
 - » 逆相関であることに留意する必要あり
 - » ±1 データポイントずらした際の相互相関係数の値を留意する必要あり

課題の達成度に関する分析

指標 1

- ・ 自身のタップ音と、他者のタップ音 or メトロノーム音との時間差
 - 先行研究 (Mardia & Jupp, 2000) に基づいて、位相差として 0~1 で評価
 - * 0 が非同期, 1 が同期
 - 0.73 以上で同期性が高い (Tognoli, Lagarde, DeGuzman, & Kelso, 2007)
- ・ (a)/(c)/(d) の 3 条件で、位相差を比較
 - (c) - 1 と (c) - 2 は同一条件として扱う

指標 2

- ・ ITI の時系列データにおける k と $k+1$ 番目のデータ値の差分を変動として算出
 - 各参加者で差分の平均を求める
- ・ (b)~(d) の 4 条件で、ITI の変動を比較 (Fig. 1a)

Results

Windowed cross-correlations of intertap intervals

協調行動の方略に関する分析

- ・ Fig. 1b~e : 96bpm において、(b)~(d) の 4 条件で課題を行った結果
 - 下段：相互相関係数の結果¹
 - * 縦軸：ずらしたデータポイント数
 - * 濃い赤：相互相関係数が高い傾向
 - * 濃い青：相互相関係数が低い傾向

¹ カラーマップに関して、例えば 5 番目のデータポイントの場合、データポイント 1~6, 2~7, 3~8, 4~9, 5~10 の範囲に分析区間の窓がある時、-1 データポイントずらして相互相関係数を求めると相互相関係数が高くなることを示唆

- Fig. 2 : 96bpm における全参加者による結果
 - (b): Hear Self
 - * lag-1, 0, +1 いずれにおいても, 相互相関係数は小さい
 - » 2者間で特徴的な方略は確認されなかった
 - (c) - 1: Hear 1
 - * lag-1 において, 相互相関係数は+1に近くなる
 - » 「リーダー-フォロワー」の方略を示唆
 - » リーダー: 参加者 2, フォロワー: 参加者 1
 - (c) - 2: Hear 2
 - * lag+1 において, 相互相関係数は+1に近くなる
 - » 「リーダー-フォロワー」の方略を示唆
 - » リーダー: 参加者 1, フォロワー: 参加者 2
 - (d): Hear Other
 - * いずれの lag においても, 相互相関係数は大きい
 - » 他者との相互調整の方略を示唆
- 各テンポで, 相互相関係数を比較した結果は Table 1 を参照
 - 相互相関係数について, フィードバック A 要因とフィードバック B 要因による 2 要因の多変量分散分析
 - * フィードバック A 要因
 - » 参加者 1 が, 参加者 1 のタップ音/参加者 2 のタップ音
 - * フィードバック B 要因
 - » 参加者 2 が, 参加者 1 タップ音/参加者 2 のタップ音
- Fig. 3 : (d) 条件で, 窓移動を 6 回行った際の lag 0 における相互相関係数
 - データポイント 1~6 の分析区間で, すでに相互相関係数の値が高い
 - * 他者との相互調整の方略に基づき, 協調行動がすぐに確立したことを示唆

課題の達成度に関する分析

指標 1 : Synchronization indices of tapping pairs

- 各テンポで, 位相差についてシナリオ要因 ((a)/(c)/(d)) を 1 要因とする分散分析 (Table 2)
 - 96bpm と 120bpm において, シナリオ要因の主効果を確認
 - * 96bpm : $F(2, 39) = 5.33, p = .009$
 - * 120bpm : $F(2, 42) = 4.94, p = .0119$
 - 96bpm と 120bpm において, 多重比較より, (c) と (d) の間で有意差を確認

- * (c) < (d)

指標 2 : Accuracy in keeping the given beat

- ・ ITI の変動について、フィードバック A 要因とフィードバック B 要因による 2 要因の分散分析
 - 96bpm と 120bpm において、A 要因の主効果を確認
 - * 96bpm : $F(1, 27) = 17.80, p = .001$
 - * 120bpm : $F(1, 29) = 5.36, p = .028$
 - 96bpm と 120bpm において、B 要因の主効果を確認
 - * 96bpm : $F(1, 27) = 13.22, p = .001$
 - * 120bpm : $F(1, 29) = 16.08, p = .001$
 - 96bpm と 120bpm において、交互作用を確認
 - * 96bpm : $F(1, 27) = 18.79, p = .001$
 - * 120bpm : $F(1, 29) = 4.93, p = .034$
 - (a) 条件の時に、特に ITI の変動が特に小さい

Discussion

- ・ 本研究では、協調行動の確立させるための方略が複数あることが確認
 - どのようなフィードバック情報を受け取るのかによって方略が決定
- ・ 他者と双方向にカップリングした状況で課題を遂行した場合
 - 他者との相互調整の方略が用いられる
 - millisecond のタイムスケールで、すぐに協調行動を確立
- ・ 他者と一方向でカップリングした状況で課題を遂行した場合
 - 2 人のうち 1 人は、他者の行動を予測できない
 - * ITI の位相差や変動が大きくなる
- ・ 他者とのより質の高い協調行動を実現するためには、以下の 2 点が重要
 - (1) 他者の行動を予測すること (Knoblich & Jordan, 2003)
 - (2) 自身の行動を他者の行動に基づいてすぐに調整すること
- ・ 今後の検討事項
 - 人間の行動に合わせて反応するコンピュータモデルが相手でも同じ結果なのか
 - リズム感覚が優れた音楽家が相手の場合、どのような方略が観察されるのか

(a)

	A Hears Self	A Hears Other
B Hears Self	Uncoupled	Unidirectional Coupling
B Hears Other	Unidirectional Coupling	Bidirectional Coupling

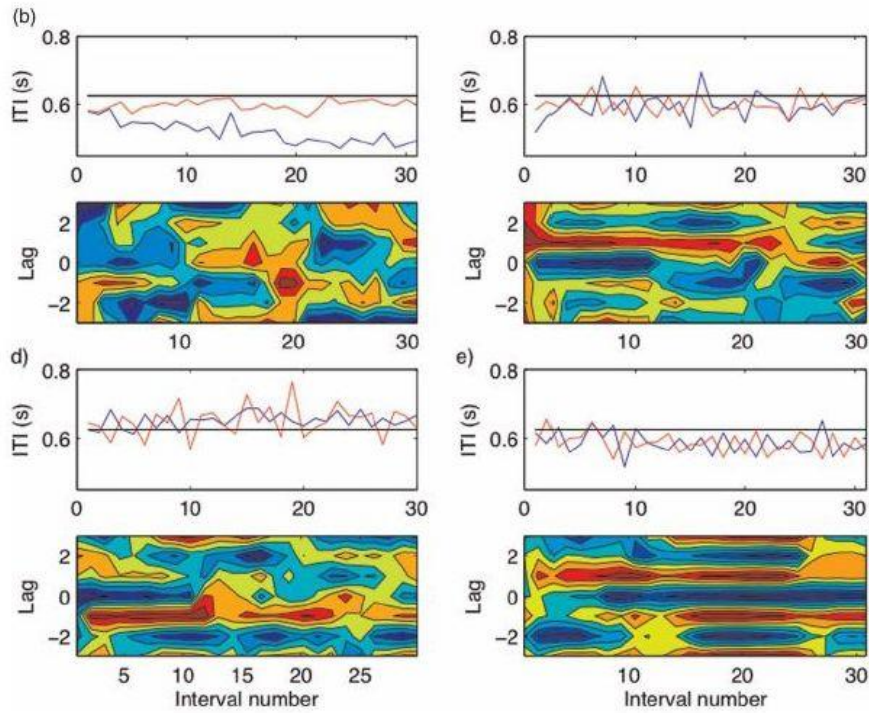


Figure 1. Windowed cross-correlations of one dyad's ITIs (intertap intervals) for the $(a) 2 \times 2$ design with Member 1's and Member 2's auditory feedback as the factors. Top plots: ITIs of Participant 1 (red) and Participant 2 (blue) against the interval number. Bottom plots: windowed cross-correlations with a lag range from -3 to 3 plotted against interval number. The colour-map correlation coefficient values range from -0.8 (dark blue) to $+0.8$ (dark red); (b) uncoupled condition—both hearing the self; (c) and (d) unidirectional coupling condition—both hearing Member 2 and Member 1, respectively; (e) bidirectional coupling condition—bearing each other.

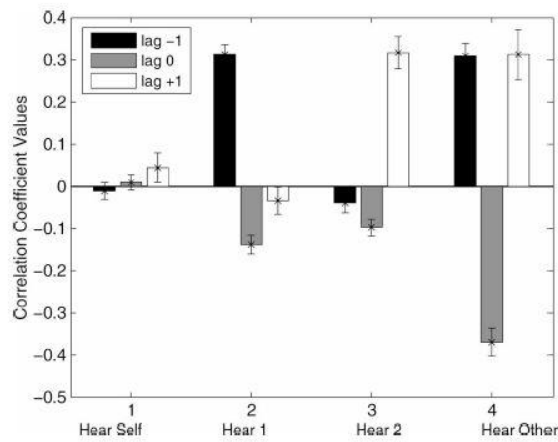


Figure 2. Windowed cross-correlation lag -1 , 0 , and $+1$ means and standard errors for the 2×2 design for a tempo of 96 bpm (beats per minute). Conditions: (1) uncoupled condition—bearing the self; (2) and (3), unidirectional coupling—both hearing Member 1 and Member 2, respectively; and (4) bidirectional coupling—bearing each other.

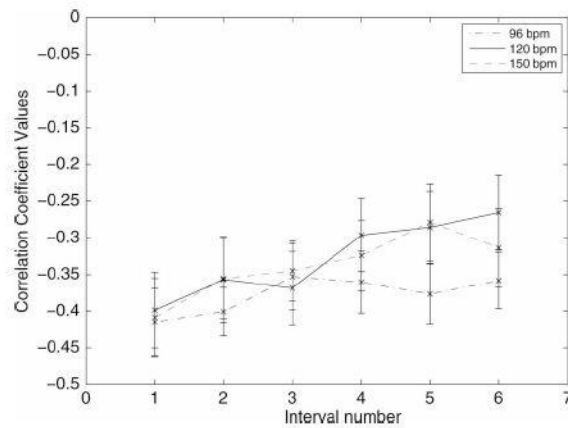


Figure 3. Means and standard errors of lag 0 windowed cross-correlation coefficient values for the first six ITI windowed 'shifts' in the bidirectional coupling condition.

Table 1. Summary of significance values from the 2×2 MANOVA design with Member 1's and Member 2's auditory feedback as the factors

Tempo	Effect of feedback	Lag -1		Lag 0		Lag +1	
		F-ratio	p	F-ratio	p	F-ratio	p
96 bpm	Member 1: other vs. self		ns	35.24	.0001	39.081	.0001
	Member 2: other vs. self	120.824	.0001	95.044	.0001		ns
	Interaction		ns	9.825	.008		ns
120 bpm	Member 1: other vs. self		ns	103.606	.0001	41.169	.0001
	Member 2: other vs. self	58.423	.0001	24.807	.0001		ns
	Interaction		ns		ns		ns
150 bpm	Member 1: other vs. self		ns	60.873	.0001	62.145	.0001
	Member 2: other vs. self	88.024	.0001	86.931	.0001		ns
	Interaction		ns	8.542	.011		ns

Note: Auditory feedback: each hearing self or other. MANOVA = multivariate analysis of variance. bpm = beats per minute.

Table 2. Means and standard errors of synchronization indices for each tempo, for hearing the computer, bidirectional, and unidirectional coupling conditions

Condition	96 bpm		120 bpm		150 bpm	
	Mean SI	SE	Mean SI	SE	Mean SI	SE
Hearing computer	.9593	.0043	.96	.0034	.9099	.019
Bidirectional	.96	.007	.9565	.0055	.9325	.0168
Unidirectional	.9318	.0088	.9213	.0154	.8956	.0287

Note: SI = synchronization index. bpm = beats per minute.