

奥行運動知覚におけるクロスモーダル残効

北川智利^{*,**}・市原 茂^{***}

* 日本学術振興会特別研究員

** 日本大学 文理学部 心理学科

〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40

*** 東京都立大学 心理学研究室

〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

1. はじめに

聴覚による空間知覚が視覚的な手がかりの影響を強く受けることは良く知られている。例えば、聴覚刺激と視覚刺激が異なる位置から同時に呈示されると、音はあたかも視覚刺激のある場所で鳴っているかのように聞こえてしまう。この現象は腹話術師の声が人形の口から発せられているように聞こえることに例えて腹話術効果と呼ばれる^{1,2)}。このような視覚の優位性は動いている対象においても生じる。静止した刺激音と共に動く視覚刺激を呈示すると、視覚刺激の運動にあわせて音も動いているように聞こえる³⁻⁶⁾。このような空間知覚における聴覚への視覚的な手がかりの影響に関しては多くの研究が行われてきたが、知覚系のどのような過程を通して視覚情報が聴覚に影響を及ぼすのかに関しては明らかになっていない部分が多い。本稿では運動残効の現象を利用して視覚から聴覚への影響を検討した研究⁷⁾を紹介してその過程について考察してみたい。

運動残効とは、一方向へ動く視覚的なパターンをしばらく見た後に、静止したパターンが反対方向に動いて見える現象であり数多くの研究が行われてきた^{8,9)}。聴覚においても類似した残効が水平運動^{10,11)}、スペクトル形状の変化¹²⁾、強度変化^{13,14)}、周波数変化^{15,16)}について報告されている。これまでの運動残効の研究では、残効の持つ選択性(例えば視覚では呈示眼選択性、聴覚で

は周波数選択性など)を利用して、その特徴を処理する機構の特性が明らかにされてきた。残効の持つ選択性が注目されるという背景もあってか、残効が感覚モダリティの境界を越えて生じると考えられることはほとんどなく(例外¹⁷⁾はある)「残効は感覚モダリティに選択的である」という暗黙の了解があったと言える。しかし、もし視覚と聴覚が独立でないならば一方の感覚モダリティでの順応がもう一方の感覚モダリティにおいて残効を生じさせる可能性がある。そこで2つの異なるモダリティの残効、すなわち、聴覚でのラウドネス変化残効^{13,14)}と視覚でのサイズ変化残効¹⁸⁾を組み合わせる実験を行った。

2. 視覚的な奥行運動への順応がラウドネス変化残効に及ぼす効化

2.1 実験 1

実験1では視覚的なサイズ変化への順応がラウドネス変化残効に影響するかどうかを調べた。サイズが変化する視覚イメージはその物体が奥行方向に動いているという強い感覚を生じさせる¹⁹⁾。視覚順応刺激の持続時間は2秒で、一辺の長さが視角にして0~2度の範囲で拡大あるいは縮小するものを用いた。聴覚刺激は順応音、検査音ともに1000 Hzの正弦波を用いた。順応音は音圧レベルが20~60 dB SPLの間を±20 dB/sの速度で上昇あるいは下降するものを用いた。持続時間は2秒で、視覚順応刺激と順応音は完全に同期する。検査音は持続時間が1.5秒

で開始時点の音圧レベルは 40 dB SPL とした。順応の条件は、2 種類の変化方向（上昇，下降）× 4 種類の視覚刺激と聴覚刺激の組合せ（聴覚刺激のみ（A+，A-），聴覚刺激と視覚刺激の変化方向が一致（A+V+，A-V-），変化方向が反対（A+V-，A-V+），視覚刺激のみ（V+，V-））の 8 条件とした。いずれかの条件の順応刺激に順応した後にラウドネス変化残効を測定した。

順応後に主観的に音の大きさが変化していないと知覚される音圧レベルの変化速度（主観的定常点）を二重上下法によって測定し、順応なし条件と順応条件の主観的定常点の差を残効量とした。順応条件では、まず順応刺激を 60 回呈示した後に検査音を呈示し、その音の大きさの変化方向（奥行れ運動の方向ではなく）を二肢強制選択で答えさせた。再順応では順応刺激を 5 回ずつ呈示した。

結果は視覚的なサイズ変化への順応が聴覚ラウドネス変化残効に影響することを示している（図 1）。視覚的な拡大・縮小パタンのみに順応した場合（V+，V-）に有意な聴覚残効が生じた。このときの残効量は音のみに順応したとき

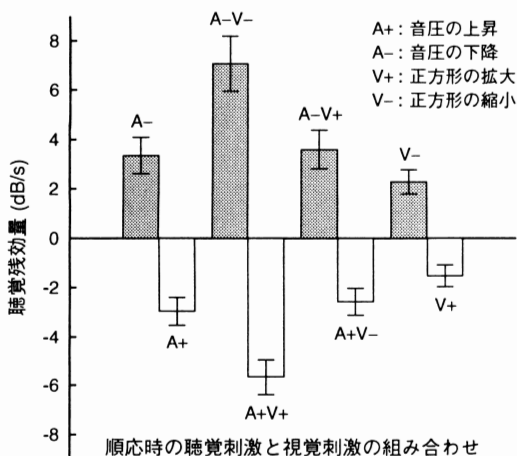


図1 サイズ変化刺激への視覚的な順応がラウドネス変化残効に及ぼす影響。縦軸は残効量（順応なし条件－順応条件）を表しており、正の値は音が大きくなっていくように聞こえる残効が、負の値は小さくなっていくように聞こえる残効が生じたことを示す。被験者 10 人の平均値とその標準誤差。

（A+，A-）よりも小さい傾向ではあったが統計的な有意差はなかった。拡大する正方形に順応した後は、変化していない検査音が小さくなっていくように、縮小する正方形に順応した後は大きくなっていくように知覚されたのである。

視覚刺激と聴覚刺激が同じ方向に変化する組み合わせに順応した場合（A+V+，A-V-）には残効量が有意に増加した。聴覚刺激のみに順応したとき（A+，A-）と反対方向の組合せ（A+V-，A-V+）に順応したときとではほぼ同程度の残効が得られたことは、反対方向の組合せ条件での残効は聴覚刺激への順応によって得られたもので、視覚順応の効果がほとんどなかったことを示す。このような特性（一致した組合せで効果が促進され、一致しない組合せで視覚の効果がなくなる）は、残効を用いていないこれまでの視聴覚研究の結果^{20, 21)}と一致している。

2.2 実験 2

実験 1 で用いたサイズ変化刺激には、奥行運動感だけでなく、輝度の変化や主観的な大きさの変化も含まれる。実験 2 では輝度変化と大きさの変化を伴わずに立体的に奥行方向に運動する視覚順応刺激を用いて、視覚的な奥行運動手がかりの効果をさらに検討した。

視覚順応刺激として、サイズを固定した正方形の両眼網膜像差を $-20 \sim +20$ min の範囲で変化させたものを用いた（図 2）。この両眼網膜像差の変化範囲は実世界では約 40 cm に相当する。聴覚刺激は実験 1 で用いたものと同じであった。実験 1 と同様に 8 条件の順応条件で残効量を測定した。その結果は、視覚刺激の影響は小さいものの、実験 1 と同様のパターンを示していることが分かる（図 3）。

視覚刺激のみに順応した場合（V+，V-）にも統計的に有意な残効が生じた。また、同じ方向に変化する組合せ（A+V+，A-V-）では残効量が大きくなる傾向が認められ、さらに、反対方向の組合せ（A+V-，A-V+）と聴覚刺激のみに順応した場合（A+，A-）とで同程度の

残効量が得られた。実験1と比べて視覚順応の影響が小さいのは奥行運動の印象が弱かったためであろう。両眼網膜像差の手がかりは、物体が比較的近い距離にある場合にだけ有効である。また、変化させうる範囲が限られていることもあって、より弱い奥行運動印象しか生じさせなかった。

視覚的なサイズ変化と両眼網膜像差の変化は

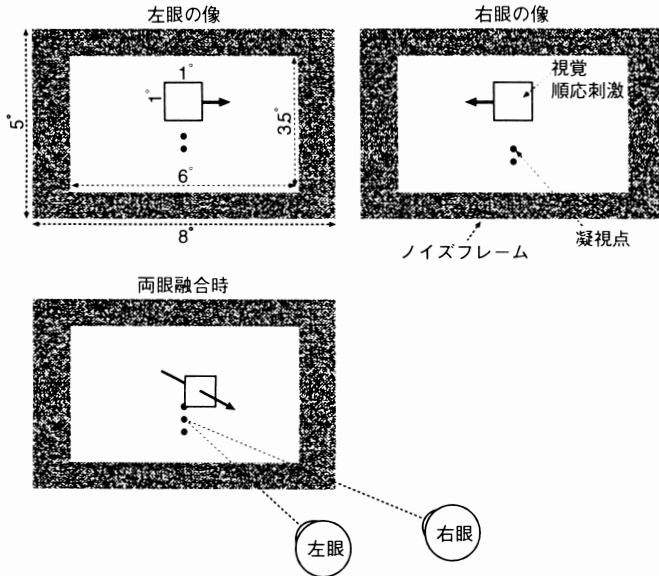


図2 実験2で用いた視覚順応刺激。中心の正方形以外は左右眼で同一である。両眼融合した状態では、正方形がノイズフレームの向こう側から手前に近づいてくように見える。

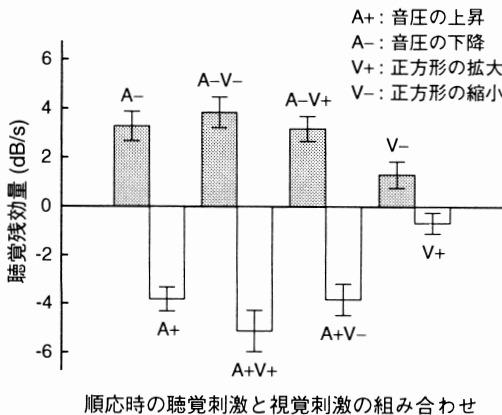


図3 立体的な奥行運動刺激への順応がラウドネス変化残効に及ぼす影響。被験者10人の平均値とその標準誤差。

どちらも奥行運動の手がかりである。しかも両者が同じように聴覚残効に影響した。したがって視覚的な奥行運動情報が聴覚残効に影響したと結論することができる。聴覚システムは、たとえ音が存在しない場合でさえ、音源の奥行運動を視覚的な手がかりから“感じる”ことができる。聴覚システムが視覚刺激を利用することには生態学的な利点がある。視覚システム

の空間解像度は聴覚システムのそれよりも高く、特に聴覚において奥行の定位は水平面での定位よりもさらに精度が低いと考えられる。実際に聴覚による運動知覚は水平面よりも奥行方向において、視覚刺激の影響をより強く受けることが報告されている⁴⁾。

実験1, 2での被験者の課題は、奥行運動の方向ではなく音の大きさの変化方向を答えることであった。また、音圧だけが変化する音を聞いても、聴覚的な奥行運動感を生じないので、被験者が検査音に対して知覚した奥行運動方向に基づいて音の大きさの変化方向

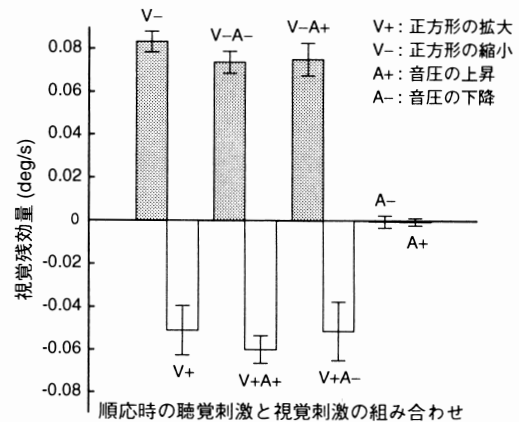


図4 音圧の変化する刺激音への順応がサイズ変化残効に及ぼす影響。縦軸は残効量(順応なし条件-順応条件)を表しており、正の値は近づいてくように見える残効が、負の値は遠ざかっていくように見える残効が生じたことを示す。被験者7名の平均値とその標準誤差。

を答えていた可能性も低いであろう。したがって、視覚的な奥行運動情報が影響を及ぼすのは、聴覚での奥行運動知覚ではなく、音圧変化の知覚であることが示唆される。

2.3 実験3

空間知覚では視覚が聴覚よりも優位であると言われている。実験3では視覚的なサイズ変化残効¹⁸⁾が聴覚的な音圧変化への順応に影響されるかどうかを検討した。サイズ変化残効とはサイズが変化する刺激へ順応した後に、静止ボタンが反対の奥行方向に動いているように知覚される現象である。検査刺激は視角にして一辺が1度の正方形を用いた。聴覚順応刺激および視覚順応刺激は実験1と同じものを用いた。実験1, 2と同様に8つの順応条件において残効量を測定した。その結果、聴覚刺激のみに順応した場合(A+, A-)には残効が生じなかったが、その他の条件では同程度の残効が観測された(図4)。この結果は、聴覚順応が視覚残効に影響を与えなかったことを示している。残効を利用することによっても空間知覚における視覚の優位性が確認された。

2.4 考察

これまでの視聴覚相互作用に関する研究は、そのほとんどが視覚刺激と聴覚刺激を同時に呈示したときの視覚刺激の効果を問題としてきた。しかし本研究では、残効を測定することによって視覚刺激のみの呈示が聴覚に影響を及ぼすことを発見した。このことは、これまで音情報だけを処理すると考えられてきた聴覚系が、視覚的な奥行運動にも反応していることを示している。聴覚皮質と視覚皮質の間には直接の神経投射は見つかっていない。したがって視覚的な順応によって生じた聴覚残効は、聴覚系と視覚系からの入力を統合し、その後遠心性の投射によって聴覚系の活動を調整するようなマルチモーダルなプロセスの働きによって生み出されているのであろう。実際に最近の脳活動を画像化する研究によって、これまで単一モダリティ情報だけを処理していると考えられてきた脳領域の活動が、他のモダリティからの入力によ

て生じたり変化したりすることが報告されている²²⁻²⁵⁾。そして他の感覚モダリティからの入力によって生じる単一モダリティ領域の活動は、マルチモーダル領域からのフィードバック投射によって実現されていることが示唆されている^{26, 27)}。このようなフィードバックの過程は私達の主観的な知覚経験と関連しているのではないだろうか。例えば、腹話術効果が生じているとき、私達には視覚刺激の場所から音が鳴っているように聞こえるのである。主観的な聴こえを変化させるためには、聴覚領域の神経活動を変化させる必要があるのかもしれない。

3. 聴覚系における奥行運動処理との関わり

実験1, 2の結果から、視覚的な奥行運動手がかりが聴覚での音圧変化知覚に影響を与えることが示唆された。しかし、音圧の変化は環境中のほぼ全ての音に含まれていると言ってよく、必ずしも音源の奥行運動を意味しない。また、感覚間相互作用は異なる感覚間で共通した特性に関して生じることが多い²⁶⁾。したがって聴覚系での音圧変化の処理が視覚的な奥行運動情報の影響を直接的に受けるとは考えにくく、その過程には、おそらく聴覚系における奥行運動処理過程が関わっていると予想される。本節では2つの実験を紹介して聴覚系での奥行運動処理が実験1, 2で確認された現象に関わっていることを示す。

聴覚系における奥行運動知覚には両耳からの情報を統合する必要があると考えられる。聴覚での奥行知覚の手がかりは音圧、スペクトル、反響であり²⁸⁾、いずれも単耳性のものであるが、強度に関しては両耳間の強度差が水平方向の定位においても重要な手がかりであり、両耳での音圧変化情報を統合しない限りは、奥行運動と水平運動の区別することができないからである。したがって、単耳だけに刺激音を呈示した場合、奥行運動知覚の成立には情報が不十分であると考えられる。

聴覚順応刺激を両耳に呈示した場合と単耳のみに呈示した場合とで、視覚的な順応の効果を

比較することによって、聴覚系の奥行運動処理がこの現象に関わっているかどうかを検討することができるだろう。単耳だけに呈示された音圧変化は奥行運動知覚の手がかりとして不充分であるから、奥行運動という次元における音圧変化と視覚的なサイズ変化との対応関係は弱くなるはずである。もし視覚的な奥行運動情報が聴覚での音圧変化処理に影響するために、聴覚系の奥行運動処理が必要であるならば、単耳で順応した際の方向一致条件(A+V+, A-V-)では視覚的な順応の効果が弱くなることが予想されるし、必要でないならば両耳で順応した場合と単耳で順応した場合とで視覚刺激の効果は同程度になるであろう。

3.1 実験4, 5

聴覚順応音を両耳に呈示し検査音を左耳に呈示した場合(実験4)と順応音と検査音の両方を左耳に呈示した場合(実験5)とで視覚的な順応の効果を比較する。実験の方法は実験1と同じである。ただし実験1, 2において順応刺激の変化方向(上昇, 下降)による結果の違いはなかったため、ここでは下降方向の4条件についてのみ検討した。

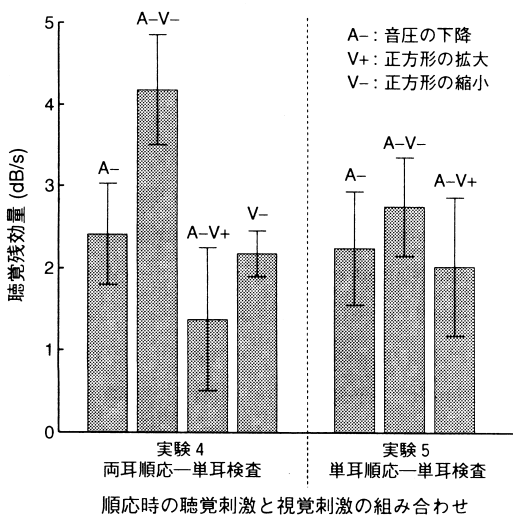


図5 サイズ変化刺激への順応がラウドネス変化残効に及ぼす効果。順応音を両耳に呈示した場合(実験4)と単耳に呈示した場合(実験5)の比較。実験4は被験者9名の平均値とその標準誤差。実験5は被験者8名の平均値とその標準誤差。

実験4の結果は実験1, 2と同様のパターンを示している(図5)。すなわち視覚刺激のみに順応した場合(V-)でも聴覚残効が生じ、視覚刺激と聴覚刺激の変化方向が一致する組み合わせに順応した場合(A-V-)には残効量が有意に増大し、変化方向が反対の組み合わせに順応した場合(A-V+)と聴覚刺激のみに順応した場合(A-)の残効量に有意差はなかった。

それに対して実験5では、A-V-条件で有意な残効量の増加は見られなかった(図5)。また、実験4でのA-V-条件の残効量は実験5でのA-V-条件よりも有意に大きかった。単耳だけに順応音を呈示することによって、変化方向が一致している場合にも、視覚的な順応の効果が現れにくくなることが分かった。したがって、視覚的な奥行運動情報が聴覚系の音圧変化の処理に影響する過程には、聴覚系での奥行運動処理が関わっていることが示唆される。

4. まとめ

実験1, 2の結果から、視覚的な奥行運動に聴覚系が応答していることが示された。視覚的な奥行運動情報は聴覚系での音圧変化の処理過程に影響を与える。2.4節でも紹介したように、これまで単一の感覚モダリティ情報を扱っていると考えられてきた脳の領域の活動が他のモダリティ情報の影響を受けることも報告されている。感覚間の相互作用はこれまでに考えられてきたよりも、比較的初期の段階から生じているのであろう。

しかし、このような比較的初期の段階からの相互作用には、より高次の処理過程も関与している。実験1, 2では、視覚的なサイズ変化と両眼網膜像差変化の両方が同じように聴覚残効に影響した。したがってサイズ変化と両眼網膜像差変化の手がかりが統合された後の視覚的な奥行運動情報が聴覚系に影響を与えていることが推測される。また、実験4, 5の結果から、聴覚系における奥行運動情報の処理過程もこの現象に関わっていることが示唆された。

これらの実験で得られた結果は、これまでの視聴覚相互作用に関する研究結果と同様の特性

(一致した入力に対する促進効果, 不一致入力に対しては効果がなくなる, そして空間知覚における視覚の優位性)を示している. したがって, 感覚モダリティの境界を越えて生じる残効は, 奥行運動知覚における視聴覚間相互作用だけでなく, 空間知覚における相互作用, さらにはその他の感覚間の相互作用を研究するためにも利用できるかもしれない.

謝辞:本研究の一部は日本学術振興会(特別研究員奨励費)の補助を受けて行われた.

文 献

- 1) C. E. Jack and W. R. Thurlow: Effects of degree of visual association and angle of displacement on the "ventriloquism" effect. *Perceptual and Motor Skills*, **37**, 967-979, 1973.
- 2) P. Bertelson and M. Radeau: Cross-modal bias and perceptual fusion with auditory-visual spatial discordance. *Perception and Psychophysics*, **29**, 578-584, 1981.
- 3) S. Mateeff and J. Hohnsbein and T. Noack: Dynamic visual capture: apparent auditory motion induced by a moving visual target. *Perception*, **14**, 721-727, 1985.
- 4) N. Kitajima and Y. Yamashita: Dynamic capture of sound motion by light stimuli moving in three-dimensional space. *Perceptual and Motor Skills*, **89**, 1139-1158, 1999.
- 5) S. Soto-Faraco, J. Lyons, M. Gazzaniga, C. Spence and A. Kingstone: The ventriloquist in motion: Illusory capture of dynamic information across sensory modalities. *Cognitive Brain Research*, **14**, 139-146, 2002.
- 6) S. Soto-Faraco, A. Kingstone and C. Spence: Multisensory contributions to the perception of motion. *Neuropsychologia*, **41**, 1847-1862, 2003.
- 7) N. Kitagawa and S. Ichihara: Hearing visual motion in depth. *Nature*, **416**, 172-174, 2002.
- 8) N. J. Wade: A selective history of the study of visual motion aftereffects. *Perception*, **23**, 1111-1134, 1994.
- 9) G. Mather, F. Verstraten and S. Anstis: The Motion Aftereffect, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1998.
- 10) D. W. M. Grantham: Motion aftereffects with horizontally moving sound sources in the free field. *Perception and Psychophysics*, **45**, 129-136, 1989.
- 11) C. J. Dong, N. J. Swindale, P. Zakarauskas, V. Hayward and M. S. Cynader: The auditory motion aftereffect: its tuning and specificity in the spatial and frequency domains. *Perception and Psychophysics*, **62**, 1099-1111, 2000.
- 12) Z. J. Shu, N. V. Swindale and M. S. Cynader: Spectral motion produces an auditory after-effect. *Nature*, **364**, 721-723, 1993.
- 13) A. H. Reinhardt-Rutland and S. Anstis: Auditory adaptation to gradual rise or fall in intensity of a tone. *Perception and Psychophysics*, **31**, 63-67, 1982.
- 14) A. H. Reinhardt-Rutland: Increasing-loudness aftereffect following decreasing-intensity adaptation: spectral dependence in interotic and monotic testing. *Perception*, **27**, 473-482, 1998.
- 15) T. Kayahara: Aftereffect of adaptation to uni-directional frequency change: evidence for selective processing mechanism. *Acoustical Science and Technology*, **22**, 49-51, 2001.
- 16) T. Kayahara, T. Sato: Two types of representation for uni-directional frequency change revealed by the changing frequency aftereffect. *Acoustical Science and Technology*, **22**, 53-55, 2001.
- 17) W. H. Ehrenstein and A. H. Reinhardt-Rutland: A cross-modal aftereffect: auditory displacement following adaptation to visual motion. *Perceptual and Motor Skills*, **82**, 23-26, 1996.
- 18) D. Regan and K. I. Beverley: Illusory motion in depth: aftereffect of adaptation to changing size. *Vision Research*, **18**, 209-212, 1978.
- 19) B. Cumming: Motion-in-depth. A. T. Smith and R. J. Snowden (eds): *Visual detection of motion*. Academic Press, London, 1994.
- 20) R. B. Welch and D. H. Warren: Intersensory interactions. K. R. Boff, L. Kaufman and J. P. Thomas (eds): *Handbook of Perception and Human Performance*,

- Volume I*. John Wiley and Sons, New York, Chapter 25, 1986.
- 21) B. E. Stein and M. A. Meredith: The merging of the senses. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
 - 22) G. A. Calvert, E. T. Bullmore, M. J. Brammer, R. Campbell, S. C. Williams, P. K. McGuire, P. W. Woodruff, S. D. Iversen and A. S. David: Activation of auditory cortex during silent lipreading. *Science*, **276**, 593-596, 1997.
 - 23) E. Macaluso, C. D. Frith and J. Driver: Modulation of human visual cortex by crossmodal spatial attention. *Science*, **289**, 1206-1208, 2000.
 - 24) J. W. Lewis, M. S. Beauchamp and E. A. DeYoe: A comparison of visual and auditory motion processing in human cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, **10**, 873-888, 2000.
 - 25) K. M. Fu, T. A. Johnston, A. S. Shah, L. Arnold, J. Smiley, T. A. Hackett, P. E. Garraghty and C. E. Schroeder: Auditory cortical neurons respond to somatosensory stimulation. *The Journal of Neuroscience*, **23**, 7510-7515, 2003.
 - 26) J. Driver and C. Spence: Multisensory perception: beyond modularity and convergence. *Current Biology*, **10**, R731-R735, 2000.
 - 27) G. A. Calvert, R. Campbell and M. J. Brammer: Evidence from functional magnetic resonance imaging of crossmodal binding in the human heteromodal cortex. *Current Biology*, **10**, 649-657, 2000.
 - 28) J. Blauert: Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization revised edition. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1997.