音による運動知覚と随従眼球運動との関係

正会員 位 田 薫[†], 正会員 渡 部 勲^{††}, 石 井 直 宏^{†††}

Control Characteristics of Smooth Pursuit Eye Movement Elicited by Auditory Stimuli

Kaoru Inden[†], Akira Watanabe^{††} and Naohiro Ishii^{†††}

Abstract : Characteristics of smooth pursuit eye movements elicited by auditory stimuli are studied in comparison with those by visual stimuli. The amplitude of response is smaller and the delay time is longer for auditory stimuli than for visual stimuli. Frequency characteristics show similar low-pass shapes in both cases.

The error of direction or motion between a target and the line of sight is detected through the retina for the visual stimulus and is generally considered to be minimized by the feedback control in the eye movement system. To obtain unity gain in the low-frequency region in such a negative feedback control system, the gain of the feedforward path of the system should be extremely high.

For auditory stimuli, feedback control does not take place since the error detector does not exist, so the frequency characteristics are measured as those of the feedforward path of the smooth pursuit system. The frequency characteristics show similar low-pass shapes for both auditory and visual stimuli suggesting that the smooth pursuit system works as a feedforward system responding to a perceived motion in both cases and is not a generally conjectured feedback control system.

1. ま え が き

運動する対象物を追う眼球運動には、両眼が同方向に動く共同運動と、左右の視線の交差角を変える輻輳運動とがある。前者の共同運動には高速で跳躍的なサ

ッケード (Saccade) と呼ばれる成分と、低速で滑らかな随従眼球運動成分 (Smooth Pursuit Movement, 以後 SPM 成分と略称する) とがあり、それぞれ異なる神経系によって支配されている。サッケードは対象物を視線でとらえるための運動で位置制御の性質を持つ

キーワード：眼球運動，運動知覚，聴覚刺激，仮現運動，制御機構

1989年7月19日，1989年テレビジョン学会全国大会で発表

1991年4月8日受付

[†] JR 東海 建設工部電気工事課 (〒100 東京都千代田区丸の内1-7-11, TEL 03-3215-8649)

[†] Electrical Engineering Section, Construction Department, Central Japan Railway Company (1-7-11, Marunouchi, Chiyoda-Ku, Tokyo 100, Japan)

^{††} 日本工業大学 情報技術センター (〒345 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1, TEL 0480-34-4111)

^{†††} Information Technology Center, Nippon Institute of Technology (4-1, Gakuendai, Miyasiro-Machi, Minamisaitama-Gun, Saitama 345, Japan)

^{†††} 名古屋工業大学 電気情報工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町, TEL 052-732-2111)

^{†††} Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of Technology (Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466, Japan)

ており、SPM は視線でとらえた対象物の動きを追う速度制御の性質を持っている。

運動が知覚される場合には、それが聴覚刺激によるものであっても眼球運動の応答が生ずるが¹⁾²⁾、筆者らはこれまで、主として視覚刺激を用いて上述のSPM成分と運動知覚との間の関係を追究し、基本的な性質をすでに明らかにしてきた。

今回は、聴覚刺激に対する眼球運動の応答を調べ、運動の知覚と眼球運動(主としてSPM成分)との関係について新たな知見を得たので報告する。

眼球運動の制御系は、一般に視線方向と注視対象物の方向との差を誤差信号とし、これを最小にするようにフィードバック制御を行っていると考えられている(後述のように、筆者らはSPM系におけるフィードバックによる誤差の補正について否定的である)。

これまでの眼球運動の研究では、一般にオシロスコープのスポットなどを視標として用いているが、この場合には網膜上で視線と対象物のずれが誤差として検出される。しかし、音刺激によって運動が知覚され、この知覚によってSPMの応答が生ずるなら、このような誤差検出は行われず、したがって、視覚系を通じてのフィードバックが働かない状態での特性を調べることができるはずである。

また、SPMは運動知覚と密接に関係していることがわかっているの、音の動きを追う眼球運動のSPM成分に着目して、音による運動知覚の性質についても調べることができると思う。

今回の実験では、運動音源として小型のスピーカを実際に横方向に動かすものと、複数のスピーカを水平に並べ、継時的につぎつぎと音を発生させるもの(視覚における仮現運動刺激に相当する)の2種類を用いた。一般のステレオ装置のように、2つのスピーカまたはヘッドホンを使用した両耳聴による擬似運動音源では、音源位置に対する知覚精度がきわめて悪く、眼球運動の測定ができなかった。

実験では、まずはじめに被験者が静止音源の方向に視線を合わせられることを確認し、その上で運動音源を追う眼球運動を検出記録し、解析を行った^{3)~5)}。

2. 視線による運動音源追跡の実験

音響的環境条件としては適当な実験室が得られないため、通常の実験室内においてスピーカの後面および下面を厚さ約10cmの綿マットで覆い、側壁面を厚手のカーテンで覆うことによって、反響による影響の改善をはかった。

被験者には視覚・聴覚機能ともに正常な男子大学生

3名を用いた。

2.1 静止音源方向と視線方向の一致精度の確認

運動音源を視線で追う実験の前に、静止している音源に対してどの程度の精度で視線の方向を合わせられるかを測定した。

1個のスピーカを被験者の前方2mにおいて左右 $\pm 16^\circ$ の範囲内でランダムに位置を変える。音源は比較的方向の知覚しやすい音としてノイズ音(FM放送の局間ノイズ)を利用した。音のレベルは被験者の頭部位置において普通騒音計(A曲線使用)を用いて測定し、57ホン一定となるようにした(以後の実験について共通)。部屋の照明は、明室および暗室について実験し、被験者とスピーカとの間に白布をたらしスピーカが見えないようにした。

眼球運動の検出には、角膜と強膜の光の反射特性の違いを利用する(赤外線LEDとシリコンフォトセルを用いる。一般にLimbus Reflection Methodと呼ばれる)竹井機器(株)製の装置(MODEL 928)⁶⁾を改造して使用し、右眼の運動を観測した。被験者の頭部はヘッドレストと歯形を装着したバイトボードを用いて厳重に固定した。この方法によれば、練習を積んだ被験者であれば横方向の眼球運動については視角約 $\pm 10^\circ$ の範囲で 0.1° 程度、 $\pm 20^\circ$ の範囲では 0.3° 程度の精度が得られる。

測定結果の一例を図1に示す。ばらつきはあるが、音源の方向を視線によって指示することは一応可能であることがわかる。照明による傾向の差異は基本的には認められなかった。被験者による違いも問題にするほどではなかった。

2.2 運動音源を追跡する眼球運動応答の測定

(1) 実験方法

図1 音刺激による方向知覚特性

Measured result of perceived direction of sound source. Subject indicated the direction with his line of sight.

運動音源としては、直径4 cmの小型スピーカをXYレコーダのペン支持部に固定し、これを運動波形用の信号で横方向に駆動する。スピーカの位置は被験者の前方46 cmで、左右 $\pm 5^\circ$ の範囲で動かした。音源にはFM局間ノイズを用い、実験は、音源が見えぬこと、妨害となる他の視覚刺激が見えぬことを条件とするため、暗室で行った。被験者には、音源の方向を見るように指示した。実験装置のブロック図を図2に示す。

(2) ステップランプ波応答

スピーカが1方向にステップ状に急激に位置を移動し、引き続いて反対方向に低速度で移動する。これを追う眼球運動の応答波形の記録例を図3に示す。眼球

図2 視線による運動音源追跡実験における実験装置ブロック図

Experimental setup for measurement of eye movement tracking motion of sound source.

図3 視線による運動音源追跡の記録例(ステップランプ波の場合)。縦の矢印はSPM発生の時点を示す。

Example of eye movement response to step-ramp motion of sound source.

はまず高速のサッケードで音源の位置変化に応答し、そのあとやや遅れて明らかにSPMと思われる眼球運動成分が発生している。サッケードの開始の遅れは平均0.3秒で、ばらつきは小さく、SPMの遅れは平均0.7秒で、ばらつきが大きかった。視覚刺激の場合には一般にサッケードの遅れは約0.3秒、SPMの遅れは約0.2秒程度で、SPMはサッケードに先行する。

この結果から、音刺激の場合には視覚に比して運動の知覚あるいは知覚系から眼球運動への命令の伝達に時間がかかることがわかる。

(3) 単一正弦波応答

図4は音源を0.5 Hzの正弦波で往復運動させたときの眼球運動の応答波形の例である。

図4 視線による運動音源追跡の記録例(正弦波の場合)
Example of eye movement response to sinusoidal motion of sound source.

図5 単一正弦波応答から求めたSPMの周波数特性
(点線は視覚刺激に対する特性)

Frequency characteristics of smooth pursuit system when the eye followed sinusoidal motion of sound source.

図6 複合正弦波応答から求めた SPM の周波数特性
直線の両端の○は組合せた周波数を示す。

Frequency characteristics of smooth pursuit system when the eye followed the motion of sound source composed of two frequency sinusoidal components.

音源の運動振幅は $\pm 5^\circ$ であるのに対して、眼球運動の応答は振幅が $\pm 10^\circ$ を超え、音源の振幅に比して著しく大きい。最下部の波形は SPM 成分を抽出したもので、音源の動きに対応した SPM が生じており、音刺激の場合でも運動が知覚されることを示している。

図5は音源の運動振幅を $\pm 5^\circ$ とした場合の SPM 成分の周波数特性である。点線は視覚刺激の場合、すなわち、オシロスコープのスポットを運動視標として測定した場合の特性を示す。視覚刺激の場合に比して音刺激の場合には、周波数が高くなると著しく利得が低下し、位相遅れも大きくなる。

視覚刺激の場合との差については、運動知覚の特性の違いや、眼球運動系との間における介在機構の存在可能性などの原因が考えられる。

(4) 複合正弦波応答

次に、周波数の異なる2種の正弦波を組合せた複合正弦波で音源を運動させ(振幅: $\pm 5^\circ$)、この場合の眼球運動の応答を測定した。応答波形から抽出した SPM 成分のみの周波数特性の例を図6に示す。この図の○を結ぶ線分は、その両端の周波数を組合せたことを示している。実線は単一正弦波の場合の応答曲線である。

単一正弦波に対する特性と比べると、組合せた2つの周波数成分のうちの低周波成分に対して利得が低下し、位相が大きく進む。この傾向は筆者らがさきに報告した視覚刺激を用いた場合⁷⁾と同じである。

図7 仮現運動刺激提示の時空間条件
Spatio-temporal patterns of acoustic stimuli presentation for apparent motion perception.

3. 音による仮現運動と視線による追跡の実験

視覚の場合に複数の光点刺激の間隔距離を適当に選び、つぎつぎと継時的に点灯すると仮現運動が知覚されることは公知である。仮現運動では、滑らかな動きの知覚と不連続な位置変化の知覚が同時に生じ、前者に対して SPM が応答する。

オシロスコープのスポットの点滅を仮現運動刺激とする筆者らの実験では、スポットを追跡する眼球運動の SPM 成分の振幅は主観評価による運動の滑らかさの印象とよく対応した⁸⁾。聴覚刺激の場合にも同様に継時的な刺激によって運動の知覚が生じ、眼球運動による追跡が行われることを予想して実験を行ったので、その結果について報告する。

まず、適当な間隔をおいて複数のスピーカを配置し、順番に1つ1つ継時的に音を発生させると、音源が滑らかに移動したような印象を生ずることを確かめた。この印象を音による仮現運動と称することとする。

被験者の前方2mの位置に水平方向に5°間隔で7個のスピーカを置く。これを片側から往復して順番に鳴らし、階段波状の音刺激とする。音源は FM 局間ノイズを用い、騒音レベルは2章の場合と同じにした。個々のスピーカ音の間に休止時間がない場合とある場合(提示時間1:休止時間9)について実験した。

図7に音刺激提示の時空間条件を示す。部屋の照明については、明室および暗室の両者について行った。

被験者にはこの音源移動を目で追わせ、眼球運動を検出記録すると同時に、運動の滑らかさの印象について、下記の5段階の主観評価を行わせた。評価尺度は次のとおりである。

図 8 聴覚刺激による仮現運動の知覚特性と SPM 応答の周波数特性
Subjective smoothness of perceived motion and frequency responses of SPM when the sound stimulus was intermittently presented changing its position.

- 5 : 非常に滑らか
- 4 : かなり滑らか
- 3 : やや滑らか
- 2 : わずかに滑らかさが感じられる
- 1 : 滑らかさは全く感じられない

図 8 に主観評価の結果と、運動を追う SPM 成分の利得特性の一例を示す。聴覚の場合にも仮現運動に対して明らかに SPM が発生するが、筆者らがさきに測定した視覚の場合 (図 5 の点線参照)⁹⁾ に比べると利得は低い。

さらに、部屋が明るい場合は暗室の場合より SPM の利得が低い。これは、前面に垂らした幕が見えるので視覚に対して静止入力が与えられたことになり、この刺激が支配的になるためと考えられる。

主観評価では、休止なしの場合が休止ありより、やや低周波から滑らかな動きを知覚するようであるが、図 8 の例では SPM の利得に関しては視覚刺激の場合と違って、休止の有無による差はほとんど認められない。

また、刺激の位置変化が速い場合 (往復周波数の高い場合) には非常に滑らかな運動が知覚されているのが主観評価値からわかるが、この性質は視覚の仮現運動の場合と同じである。視覚刺激の場合には刺激の位置変化が速いと実際運動との区別がつかなくなり、SPM の振幅は連続運動刺激の場合に近づく。これに対し音刺激では、図 6 と図 8 の比較からわかるように、実際運動の場合に比して往復周波数が高い場合でも SPM の利得は小さい。

さらに、実際運動の実験の場合と同様に、2 周波数の複合正弦波に相当する仮現運動についても SPM 応答の観測を試みたが、この場合には SPM がほとんど生じなかった。

4. 検 討

4.1 周波数特性について

運動音源を用いて測定した単一正弦波の場合の周波数特性は、開ループ状態での SPM 系が単純なローパス特性を持つことを示している。一方、オシロスコープのスポットを追跡するような視覚刺激の場合にも、ほぼ類似したローパス特性が得られる (図 5 参照)。このように両者の間に基本的な違いがないということは、視覚刺激の場合に考えられる「視覚系を通じてのフィードバック」による誤差の補正という現象が特性上に現れていないということを意味する。すなわち、聴覚刺激の場合には運動対象の方向と視線方向との誤差を検出する機構が存在しないが、この場合の制御特性と、視覚刺激の場合の特性が基本的に一致するということは、視覚刺激の場合もフィードバックループは存在せず、本来 SPM 系はフィードバック系ではなく、次に図 9 で説明するように、フィードフォワード系として動作していると考えるのが妥当であろう。

また、複合正弦波に対しては、視覚刺激による場合と同様に、音刺激の場合にも低周波成分に対して利得低下と位相進みが観測された。

これらの結果は、聴覚刺激の場合にも図 9 の SPM 系のモデルが適用できることを支持する。

図 9 運動知覚機構と眼球運動 SPM 系との関係を示すモデル
Model of smooth pursuit eye movement control system combined with motion perception.

眼球運動制御機構は、一般には前述のように、視線方向と視標方向との差が誤差信号となって動作するフィードバック制御系と考えられている。ここで、SPM 系はサッケード系に対して独立に制御されていることがわかっている。

しかし、筆者らはこれまで種々の実験事実によって、運動視標追跡時の SPM 系は誤差信号を入力とするネガティブフィードバック系ではなく、知覚された運動がそのまま入力となるフィードフォワード系として働いていることを示してきた⁷⁾。

運動を知覚するためには、われわれは空間の知覚、背景と対象物との相対的位置変化、自己の眼球運動などの情報を利用している。暗室中で光点視標を追う場合、視線が忠実に対象物をとらえ、網膜上の像位置が固定されている場合でも、自己の眼球運動を知覚することによって、ほぼ正確に視標の動きを知覚することができる。このような場合の眼球運動の制御機構は図 9 のモデルによって説明することができる。

この図において、II の経路には眼球力学系のレプリカが存在し、その出力が I の経路の信号を打ち消す。この信号が自己の眼球運動の情報を表す。経路 II が存在することによって運動知覚への入力は視標方向そのものとなり、対象物の運動がそのまま知覚されることになる。そして、SPM 系はこの運動知覚の出力により駆動される。

このモデルでは、なんらかの刺激によって運動が知覚されればそれが刺激となって SPM を発生する。したがって、運動する“音”刺激によっても SPM が発生することが予想される。

また、2 つの周波数の複合正弦波信号で視標を駆動した場合の応答では、単一正弦波の特性に比べて、低周波成分の利得が低下し、位相が進むことが今までの実験で確かめられているが⁷⁾、この現象は次のように説明可能である。

速度制御系である SPM 系には運動速度検出のための微分要素があって、これにより位相が 90° 進む。視標の動きが予測可能な場合には、SPM 系の中でこの進位相を補正するが、予測が困難な場合にはこの進位相が出力に現れる。複合正弦波では周波数の高い成分が目立ち、低い周波数の成分は相対的に予測が困難になり、位相が進むことになる。

もし SPM 系がネガティブフィードバックにより誤差補正をしているのであれば、このような位相進みは起こりにくい。この点からも SPM がフィードフォワード系として動作していることが裏づけられる。

筆者らは、このような制御特性を定量的に説明するモデルをすでに提案しているが、このモデルについては文献 7) を参照されたい。

4.2 仮現運動の応答について

図 5 および図 8 を比べると、実際運動の場合に比して仮現運動刺激に対する SPM の利得が明らかに小さい。この理由は、主として刺激の運動振幅の違いによるものと考えられる。すなわち、SPM 制御系は速度飽和の性質を持ち、刺激の運動振幅が大きい場合には、相対的な利得が著しく低下することは視覚刺激実験においてすでに確かめられている⁷⁾。今回の実験では、実際運動の場合の音源の運動振幅は $\pm 5^\circ$ であり、仮現運動の場合は図 7 の実験条件に示したように $\pm 15^\circ$ であって、後者の場合の利得が低く現れることはうなづける。しかし、定量的な点については仮現運動知覚の性質との関係において今後さらに検討を要する。

2 周波数の複合正弦波による仮現運動刺激に対しては、ほとんど SPM の応答が生じなかった。この理由としては、聴覚の運動知覚の特性が視覚と異なるためと想像される。すなわち、聴覚の場合、図 1 のように方向知覚においてばらつきが大きいこと、また、ステップラング波応答における遅れ時間から推察されるよ

うに、運動の知覚に時間が余計にかかること、これらが予測しにくい運動に対してとくに大きく影響しているためではないかと考えられる。

5. む す び

聴覚を通じての運動の知覚およびこれに伴う眼球の運動について、両者の関係性を実験的に調べ、視覚刺激による場合と比較検討した。

まず、音源を実際に動かした場合、複数のスピーカを継時的に駆動した場合、ともに滑らかな運動を知覚することを確かめた。

次に、視覚刺激の場合に比べると音刺激の場合のSPM成分のスタートにおける遅れが大きいこと、周波数特性は視覚刺激の場合と同様に単純なローパス型となるが、高周波域の振幅が小さく位相遅れが大きいことなどを確かめた。この特性の違いは運動知覚にかかわる神経系の性質の違いによるものと考えられる。

2周波数を用いた場合の周波数特性も視覚刺激による場合と基本的に同様で、低周波数成分に対して利得低下と位相進みを示した。

聴覚刺激の場合には視線方向と音源方向との誤差を検出することはできないので、眼球運動の制御系は知覚した運動が入力信号となるフィードフォワード系として動作しているものと考えられる。したがって、周波数特性が基本的に視覚刺激の場合と類似していること、そして、2周波数の場合の両者の特性も類似していること、これらの事実は筆者らが以前から提唱しているように、視覚刺激の場合にもSPM系はフィードフォワード系として動作していることを裏づけている。

複数のスピーカから継時的に音を発生する仮現運動刺激に対してもSPMは応答を示す。ただし、2周波数駆動の場合にはほとんどSPMの発生が認められなかった。その理由としては、音源の方向知覚の不正確さや運動知覚の遅れに起因するものと推察される。

以上、聴覚による運動知覚と眼球運動の関係について調べ、基本的な性質を明らかにしたが、なお推察の

域を出ない点については今後の課題として追究したい。

【参 考 文 献】

- 1) C. Gottschalk, O.-J. Grusser, M. Lindau: "Tracking Movements of the Eyes Elicited by Auditory Stimuli of a Constant Angular Velocity", Pflügers Archiv für die Gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere, 377, 46 (1978)
- 2) D. Zambbarbieri, R. Schmid, C. Prablanc, G. Magenes: "Characteristics of Eye Movements Evoked by the Presentation of Acoustic Targets", in Progress in Oculomotor Research, Eds. A. F. Fuchs, W. Becker Elsevier, N. Y. (1981)
- 3) 位田, 館, 池内, 渡辺, 平野, 渡部, 吉田: "音による運動知覚と眼球運動との関係", 1989年テレビ大全, 17-7
- 4) 位田, 野田, 古田, 石井, 渡部: "音刺激を利用した随従眼球運動制御機構の解析", 計測自動制御学会, 第4回生体・生理工学シンポジウム, 1C3-3 (1989)
- 5) 位田, 野田, 古田, 石井, 渡部: "音による運動知覚と眼球運動との関係", 信学技報, IE89-87 (1990)
- 6) 山田, 福田: "視線の動きを用いたテレビ画像の分析", テレビ誌, 40, 2, pp. 121-128 (1986)
- 7) 渡部, 久住: "随従眼球運動の制御特性とそのモデル", 信学論誌, J69-D, p. 1810 (1986)
- 8) 渡部, 石川: "仮現運動と眼球運動との関係—モデルの構成—", テレビ誌, 39, 8, pp. 719-725 (1985)

いん でん かおる
位田 薫 昭和63年、名古屋工業大学電気情報工学科卒業。平成2年、同大学大学院博士前期課程電気情報工学専攻修了。同年、JR東海建設工事部に入社。リニアモーターカーの開発に従事。大学院在籍中に、眼球運動制御機構の研究を行う。正会員。

わた なべ あきら
渡部 亁 昭和24年、慶応義塾大学工学部電気工学科卒業。同年、NHKに入局。現業技術、技研、基礎研を経て、57年、名古屋工業大学電気工学科教授。平成元年、日本工業大学電気電子工学科教授となり、現在に至る。視覚に関する工学的研究に従事。工学博士。正会員。

いし い なおひろ
石井 直宏 昭和38年、東北大学工学部電気工学科卒業。43年、同大学大学院博士課程電気および通信専攻修了。43年、東北大学医学部助手。50年、名古屋工業大学情報工学科助教授。現在、同大学電気情報工学科教授。生体情報処理および人工知能の研究に従事。工学博士。