

平衡神経・眼球運動シミュレータを用いた 良性発作性頭位めまい症の治療支援

Computer-aided diagnosis of benign paroxysmal positional vertigo
using balance control and eye movement simulators

吉村 昌悟¹ 御堂 義博¹ 中前 幸治¹ 今井 貴夫² 関根 和教³ 武田 憲昭⁴
Shogo Yoshimura Yoshihiro Midoh Koji Nakamae Takao Imai Kazunori Sekine Noriaki Takeda

1. まえがき

良性発作性頭位めまい症 (Benign Paroxysmal Positional Vertigo: BPPV) は、三半規管中に生じた半規管結石やクプラ結石が原因で、特定の頭位を取ることににより回転性めまいが引き起こされる代表的な末梢性めまい疾患である。BPPVの治療法として耳石置換法が広く用いられている。これは、頭部・体幹を連続して素早く倒すことにより、クプラに付着しているクプラ結石を引き剥がし、半規管結石を三半規管の外まで移動する方法である。本研究では、開発している三次元半規管モデル・ニューラルネットワークに基づいた前庭から眼球運動までのシミュレータ[1]を用いて、耳石置換法時における診断支援を試みる。

2. 開発したシミュレータ

我々は、前庭に刺激を与え、神経系を通り、眼球運動を行うまでのシミュレータを開発している[1]。本シミュレータは、図1に示すように、前庭のセンサ・ニューロン応答・眼球運動の3つのシミュレーションが統合されている。まず、前庭の耳石器と三半規管によって、頭の運動を感知する。半規管のシミュレータは内リンパの移動を計算し、神経に入力される頭の角速度を計算する。半規管、耳石から得られた角速度および重力と慣性力の合力から、眼筋への刺激までの計算を、ニューラルネットワーク構築の手法を用いたシミュレーションによって行う。眼筋への刺激は以下の2つの性質を有する。

1. 頭の角速度とは逆方向の角速度で眼球が運動する
2. 頭の数度とは逆方向に眼球が運動する

最終的に、ニューラルネットワークで与えられる刺激に対して運動方程式を解くことによって、眼球運動を計算する。本研究では、本シミュレータをBPPV治療支援へ応用するため、以下の2つの機能を有する。

1. 頭位変換によって、クプラ結石がクプラから外れる現象をモデル化
2. 頭位変換によって、半規管中の複数の結石が密集したり、拡散したりする現象をモデル化

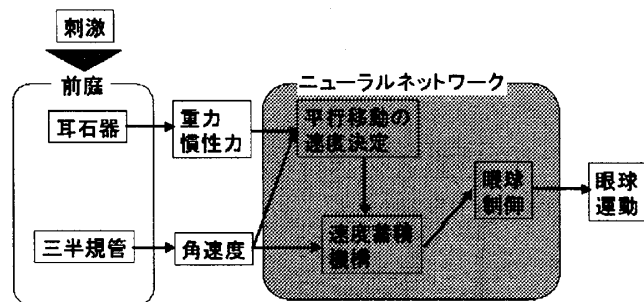


図1. 平衡神経・眼球運動シミュレータの全体図

3. Lempert法における眼振シミュレーション

Lempert法は、外側半規管に結石が存在する場合に用いられる治療法である。図2に右外側半規管に対するLempert法の体勢変化の手順と、その時の半規管中の結石の移動を示す。重力による結石の移動が落ち着くまで体勢を静止させながら仰向けの状態(a)から(b)、(c)の順に頭を傾ける。

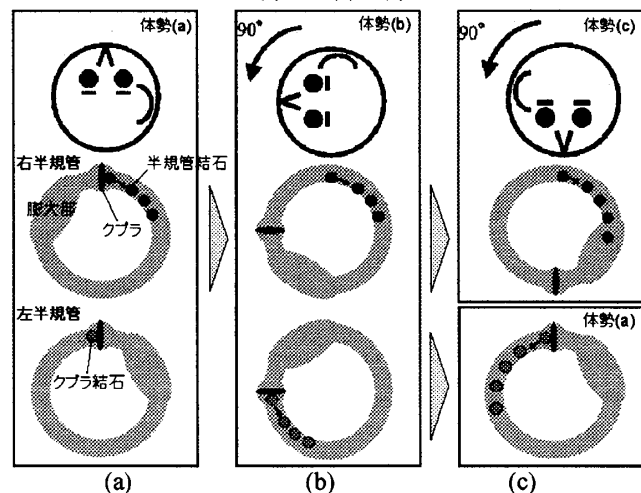


図2. Lempert法の手順と結石の移動

左半規管にクプラ結石症の所見が見られる患者に対して、Lempert法による治療を行った際の眼振データを図3(a)に示す。縦軸が角速度[deg/sec]、横軸が時間[sec]である。時間0秒において手順(b)への体勢変化がなされており、図中の逆三角印はクプラ結石がクプラから外れたと想定される時間を示す。体勢変化に伴って、クプラ結石の重力からクプラが受ける力が増加することによって眼振は徐々に増加する。やがて逆三角印の時点で、クプラ結石がクプラから外れると眼振は急激に増加する。これはクプラ結石よりも、半規管中に漂う半規管結石のほうがク

¹ 大阪大学 大学院情報科学研究科

² 大阪船員保険病院 耳鼻咽喉科

³ 屋島総合病院 耳鼻咽喉科

⁴ 徳島大学 大学院医学研究科

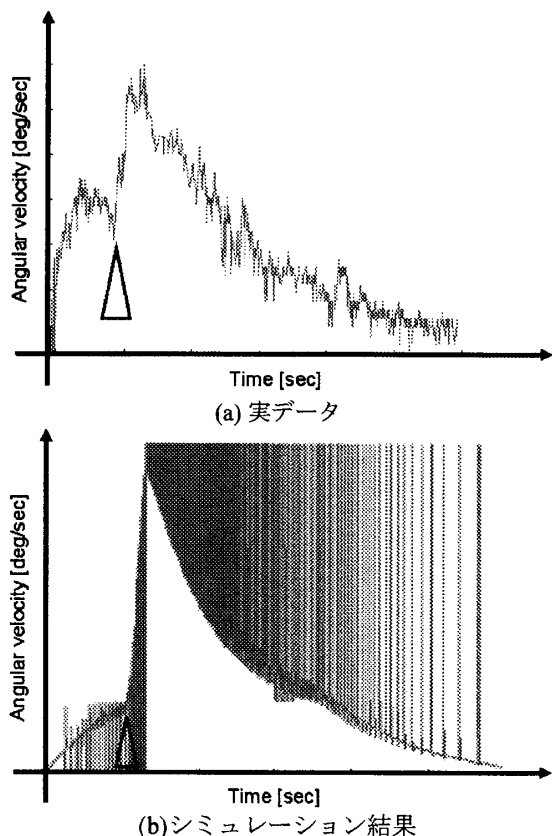


図3. Lempert法における眼振データ

プラに及ぼす力が強いからである。その後、眼振は緩やかに減少していく。

そこで、本シミュレータを用いてLempert法の体勢変化中、任意の時間にクプラ結石を外して眼振のシミュレーションを行った。図3(b)は、図2(b)の体勢変化後しばらくしてからクプラ結石が外れた場合の眼振を示す。図3(a)と図3(b)を比較すると、近い眼振が得られており、患者の治療時にも図2(b)の体勢においてクプラ結石が外れ、半規管結石になったと考えられる。

4. 結石の密集・拡散モデル

頭位変換において、結石は半規管中を密集したり、拡散したりしながら移動し、それに伴う眼振が発生する。結石が拡散するほど、クプラにかかる流体力学的な力が打ち消し合うために眼振が減少する。この現象をシミュレーションするために、結石の密集・拡散状態をモデル化した2つの配置を実装した。

結石の数珠繋ぎ配置 (密集状態)

クプラ膨大部を基準点として、複数の結石を基準点から数珠繋ぎになるように設置する。

結石の等間隔配置 (拡散状態)

クプラ膨大部を基準点として、複数の結石を等間隔に設置する。

結石の総質量が0.0879[μg]で一定となるように結石の半径と個数を変更し、Epley法の第2姿勢におけるクプラの移動量(圧力により変化する移動量)をシミュレーションした。結石の半径と個数との関係を表1に示す。図4(a)が数珠繋ぎ配置、図4(b)が等間隔配置でのクプラ

移動量を示す。図4(a)では、結石半径が小さくなるほど、クプラ移動量がピークになるまでの時間が長くなる。また、結石半径が小さくなるほど(結石個数が多くなるほど)クプラ移動量のピークが増加している。両者の傾向は文献[2]と一致する。一方、図4(b)でも同じく結石半径が小さくなるほどピークになるまでの時間は長くなる。しかし、結石個数が多くなるほど対称の位置に存在する結石により生じた圧力同士が打ち消し合うため、10[μm]をピークとしてクプラ移動量のピークが小さくなった。

本シミュレータを用いて、患者の状況を模して眼振を計算することにより、現在の結石の位置を推測することができ、頭位変換による治療の精度向上が期待される。

参考文献

- [1] S. Kohigashi, K. Nakamae, and H. Fujioka, "Image-based computer-assisted diagnosis system for benign paroxysmal positional vertigo," in Proc. SPIE: Image Perception, Observer Performance, and Technology Assessment, San Diego, USA, 5749 (12-17 Feb 2005).
- [2] S. M. Rajguru, M. A. Ifediba and R. D. Rabbitt: "Three-dimensional biomechanical model of benign paroxysmal positional vertigo", Annals of Biomedical Engineering, 32, 6, pp. 831-846, 2004.

表1. 重さが0.0879[μg]時の結石の半径と個数

結石の個数[個]	1	2	4	8	13	18	28
結石の半径[μm]	18	15	12	10	8.5	7.5	6.5

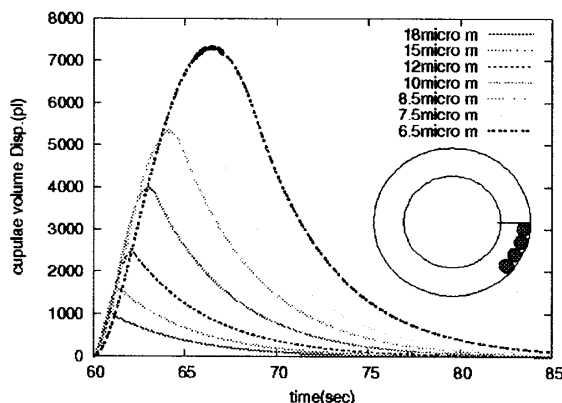


図4(a). 各半径に対するクプラの移動量(数珠繋ぎ)

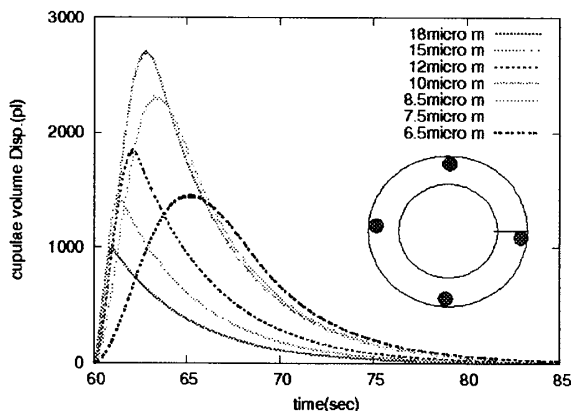


図4(b). 各半径に対するクプラの移動量(等間隔)