

自然視と人工の3D立体視における水晶体調節と両眼輻輳の同時測定

Simultaneous measurement of lens accommodation and convergence in natural and artificial 3D vision

塩見 友樹, 梅本 啓太, 小嶋 健仁, 佐野 峻太, 石尾 広武¹⁾, 高田 宗樹²⁾, 大森 正子³⁾, 渡邊 智之⁴⁾, 宮尾 克
名古屋大学情報科学研究科, 1) 福山市立大学, 2) 福井大学, 3) 神戸女子大学, 4) 愛知学院大学

抄録 3D 技術における最近の進歩には眼疲労の増加が伴った。そのような疲労の従来の通常の説明は、調節と輻輳が立体映像中にミスマッチしているため、ということである。

本研究の目的は、若い被験者の中で、彼らが実物の視標と3Dビデオクリップを見たときの水晶体調節と輻輳の両方の焦点距離を同時測定することであった。この測定は独自の測定機器を使用してなされた。3Dビデオクリップは、液晶シャッター・グラス・システムを使用して、被験者に提示された。結果は、実物の視対象を見るとき、被験者の調節および輻輳のジオプトリー値は、周期的に視対象の動きに類似して変動したことを示した。この測定法は、立体映像の測定において適切であると考えられました。さらに、被験者が3Dビデオクリップを見たとき、私たちは水晶体調節と輻輳を測定した。調節と輻輳の両方は、3Dビデオクリップの仮想位置と一致して変動することが分かった。したがって、3Dイメージを見ているときに、調節と輻輳の間に不一致はほとんどなかった。

キーワード：同時測定、水晶体調節、輻輳、3D、立体視

Keywords — simultaneous measurement, accommodation, convergence, 3D, stereoscopic vision.

DOI # 10.1002/jsid.156

Journal of the SID, 2013

Received 08/16/12; accepted 03/15/13.

1 研究目的と背景

3D映画やテレビにおいて使用されるもののよう、進んだ三次元(3D)表示が、今日ますます一般的に広がっている。市場拡大をめざす電機メーカーは、3Dデジタル・デバイスを備えた製品のラインを強化している。立体映像装置は従来の二次元の映像より多くの情報を伝えることができる。情報のより大きな分量を伝えることができる能力は、3D技術の開発の1つの理由かもしれない。しかしながら、立体画像を見る場合、人々はときどき眼疲労や3D酔いの症状を呈することや、その他の不快な感じになることがある¹⁾。

水晶体調節と輻輳は人間の視覚の中の重要なシステムである。Toates²⁾は調節と輻輳の研究をレビューした。そして、調節は、目標がはっきり見えるように、焦点を合わせていること、他方で、輻輳は、両眼で同じ対象物に中心窩を合わせるために、眼球を動かすことを必要とする。調節は、眼の毛様体筋の収縮とそれによる水晶体の柔軟性の結果として行なわれる。その結果は、外界中のイメージが網膜(図1)に焦点を合わせるのである。輻輳は、単一の両眼視を得るか、あるいは、維持するために、両眼の同時の反対方向運動(それぞれが、近づくか、遠ざかるか)である。輻輳は、両眼が反対方向に回転する運動である(Fig. 2)。

調節と輻輳の関係は、人間が両方の目で1つの対象物を見ることを可能にする要因の1つである。Toates^{2), 3)}は、目標の接近が輻輳をもたらす、特別な努力を要する調節は、輻輳の神経支配に関係するように見えると述べた。調節と輻輳は、相互に関連している制御システムである。それは、通常の状態のもとでは、調節はある範囲で、輻輳に依存することができる。

イメージが両方の眼(視差)で違った風に捕らえられる場合に、輻輳が生じる。これは、液晶シャッター・システム、レンチキュラー・システムおよび偏光フ

ィルター・システムのいずれかを用いて、3Dイメージを表示する方法のうちの主要なやり方である。それは多くの改善の工夫がなされた分野^{4), 5)}である。

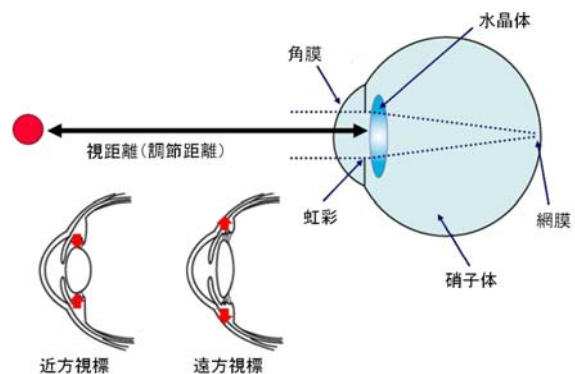


図1. 水晶体調節の原理

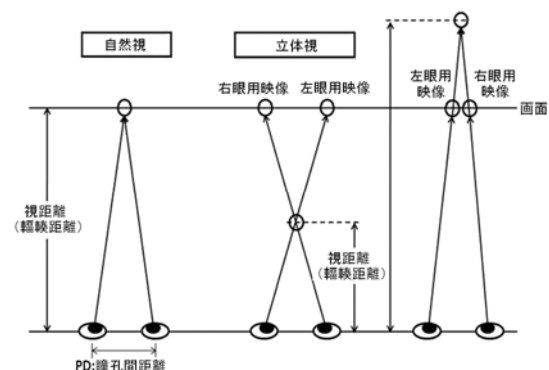


図2. 輻輳の原理

3Dの使用が増加したので、立体映像に関する多くの研究がなされた。これらの研究の多くでは、水晶体調節と輻輳は、3D映像を見ているときに解離している(図3)とみなされてきた。すなわち、水晶体調節は、常に映像が表示されるスクリーン上に固定されているが、他方、輻輳の両眼の視線は立体映像の位置で交差しているというものである。その結果、眼疲労およびその他の関連する症状が出現する^{6), 7)}。水晶体調節と輻輳の間の矛盾というこの見解は非常によく知られている。

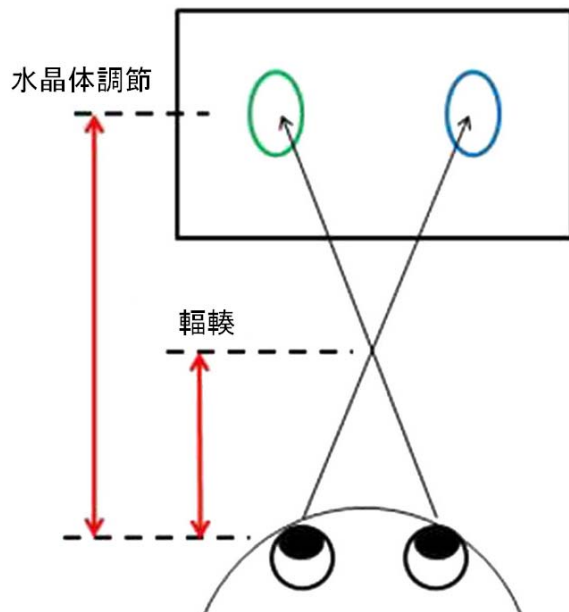


図3. 水晶体調節と輻輳の不一致という従来の説

しかしながら、他の2~3の研究も同様の結果を示しているが、我々は、以前に調節と輻輳の間にあると推定されている矛盾は生じていないことを示す結果を得た⁸⁾。Pattersonは、調節-輻輳矛盾は、このような映像の観察者に対して存在するかもしれないが、このような問題はディスプレイが眼に近いときにのみ生じやすいことを発見した。なぜなら、視距離が短い場合、被写界深度が浅いからであると述べた。Pattersonは、さらに、被写界深度のおかげで立体映像を見るほとんどの条件のもとで、調節-輻輳矛盾は起きなさそうであることを示した⁹⁾⁻¹²⁾。我々の従来の研究で行なわれた測定は、被写界深度の範囲にあり、したがってPattersonの発見に一致する。

我々は、従来の研究では調節と輻輳の同時測定ができなかった。しかしながら、調節と輻輳の間の解離をさらに研究するには、そのような測定が必要である。そこで我々は、調節と輻輳を同時測定する方法を開発した。

人工的な立体映像を研究する際に、自然視の状態の正確な測定と比較することは不可欠である。したがって、我々は、自然視における水晶体調節と輻輳の正確な同時測定を行なった。その後、我々は、被験者が3Dイメージを見ているときに同様の同時測定を行ない、水晶体調節と輻輳の間に矛盾が存在するかどうか研究した。

2. 方法

我々は2つの実験を行なった。最初の実験はこの同時測定の方法が正確にできるかどうか確認するために行なわれた。第2の実験は、被験者が3D動画を見ているときに、水晶体調節と輻輳の間に解離が存在するかどうかを研究するために行なわれた。これらの実験の中で使用された装置は、オートレフ・ケラトメーターWAM-5500(株式会社シギヤ精機製作所、広島; 図4)およびアイマークレコーダEMR-9(ナック・イメージテクノロジー株式会社、東京; 図5)であった。



図4. オートレフ・ケラトメーター WAM-5500



図5. アイマークレコーダ EMR-9

被験者が遠くの固定された視標を見ている間、WAM-5500 は、開放された両眼視野を被験者に与えることができる。この装置には 2 つの測定モード（静的モードと動的なモード）がある。我々は本実験で動的モードを使用した。WAM-5500 は、2 段階で屈折値を算出する。赤外光の輪の標的は網膜に反射してから後に結像される。赤外光の波長は 950nm である。最初の測定においては、焦点のすぐそばに輪を置くために、レンズが、電動軌跡をすばやく移動する。その後、輪の標的の結像は、デジタルで分析される。これらの最初とその後の引き続く測定において、多数の子午線の方角に関するドーナツ型の屈折の値を計算される。

メーカーが供給する模擬眼球モデル（屈折力：-4.5D）を、WAM-5500 が動的測定モードで屈折測定することで、機器の正確性を評価できる。WAM-5500 は、高速（連続測定）モードの設定で、時間分解能 5 Hz の速さで屈折値のデータを収集することができる。機器のソフトウェアは動的モードで結果を記録した。結果には、瞳孔径と平均等値化球面屈折の値とそのサンプリングした時刻を含み、これらはエクセルの CSV ファイルの形式で、数秒でまとめることができる^{13), 14)}。

それと同時に、EMR-9 は瞳孔／角膜反射法で眼球運動を測定するために使用された。水平方向の測定可能レンジは 40 度であり、垂直方向のレンジは 20 度だった。また、サンプリングレートは 60Hz であった。この機器は、被験者の顔の左および右側に固定された 2 台のビデオカメラから成り、また、前額部の上に固定された、別のカメラ（被験者の視野の撮影ユニット）が追加されていた。赤外光照射の場所は左右の下眼瞼の前に配置してあった。両側のカメラは、それぞれの角膜から反射された赤外光を記録し、他方で、額の上のカメラがスクリーンに表示された映像（被験者がながめている風景）を記録した。コントローラーは、これら 3 台からの記録をスーパーインポーズし、0.01 秒単位の電子時計の時刻とともに、メモリーカードにまとめて入力した。EMR-9 は、1 度を超えるか、もしくは 0.1 秒を超える眼球運動の追跡を記録した。この機器はさらに注視時間を（0.1 秒を超過する場合に）特定した。我々はこの技術によって眼の注視点を決定することができた。この機器の赤外光の波長は 850nm であり、他方、WAM-5500 の波長は 950nm であった。これらのデータはすべて SD メモリーカード上に保存され、また、PC に読み込むことができた^{15), 16)}。

被験者は、事前に実験の十分な説明を与えられ、また、同意が得られた。被験者は裸眼のままで、あるいは、必要な場合は、ふだん装用しているソフトコンタクトレンズや眼鏡を使用した。また、被験者の屈折は ± 0.25 ジオプトリー内に矯正された。（ジオプトリー（D）は、水晶体の屈折率であり、調節力のインデックスである。それはメートルの逆数である。例えば、0D は無限を表わし、0.5D は 2m を意味する、1D は 1m であり、1.5D は 0.67m である。2D は 0.5m であり、また 2.5D は 0.4m である。） 2 つの装置（WAM-5500 と EMR-9）は、水晶体調節と両眼輻輳を同時に測定するために組み合わせられた。我々は、調節と輻輳の焦点距離を同時に測定した。その際に被験者は視対象物を見つめており、2 つの装置がそこに備わっていた（図 6）。

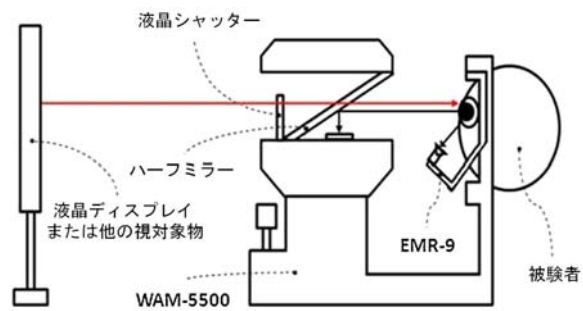


図 6. 実験の模式図

2. 1 実物の視対象に対する水晶体調節と輻輳の同時測定

最初の実験は 6 人の健常な青年（20 歳～37 歳）であった。実験は以下の手順で行なわれた。被験者の調節と輻輳は、彼らが両眼視で、かれらの前方に示された視対象物（テニスボール：直径 6.6cm）を注視している状態で測定された。視対象物の初期位置は、被験者から 1 m 離れたところであった。この距離は、のちの立体映像の実験の条件と一致させるための距離である。視対象物は、被験者から 1 m（1 D）の初期状態から始められ、その後、0.5m（2 D）被験者に近づいた。そして、再び最初の 1 m の位置に戻った。この移動の範囲は 1 ジオプトリーと等価であった。したがって、この視対象物の動きは、両眼の調節のために十分な刺激を提供したといえる。1 回の測定に当たって、この物体の移動は 4 回繰り返され、合計 40 秒であった。WMT-1 システム（株式会社シギヤ精機製作所、広島）が、テニスボールの移動に使用された（図 7）。

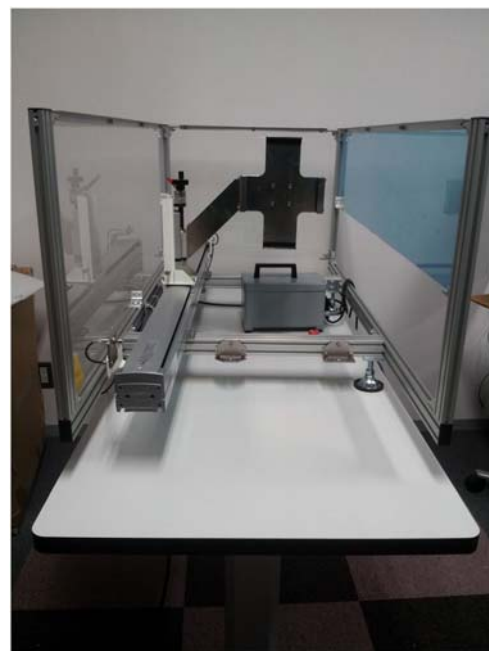


図 7. WMT-1 視対象物を動かす装置

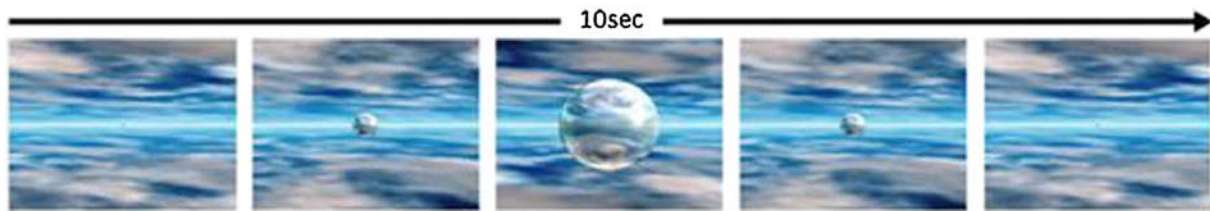


図 8. 3 D 動画

この装置はトランスファー・マシンで、正弦曲線、三角波あるいはステップ移動のモードで視対象を移動させることができる。本実験においては、正弦曲線運動を使用した。実験室の照度はISOの標準に準拠した。被験者の眼の部位における水平面照度は 683 ルクスであり、鉛直面照度は 103 ルクスであった。この環境におけるテニスボールの輝度は 46.9 cd/m^2 であった。背景の輝度は 56.7 cd/m^2 であった。

2. 2 3 D 動画に対する水晶体調節と輻輳の同時測定

別の実験が、6 人の健常な青年（実験 1 と同じ被験者）で行なわれた。前の実験と同様に、被験者が液晶モニターで、被験者の前方に 3 D 動画として表示された球体を両眼視で注視しているときの、被験者の調節と輻輳が測定された。3 D 立体動画は、実物体のときと同様に 10 秒周期で同様の動きを繰り返した(図 8)。液晶モニターは被験者から 1m の位置に置かれた。液晶シャッター・システムと 19 インチのモニター (FlexScanS1911、EIZO) が、この実験で使用された。このモニターの性能は表 1 に示す。

表 1. ディスプレイの性能

Characteristics	Value
Screen resolution	1280 × 1024
Color usage	16,190,000
Size	19 in.
Pixel pitch	0.294 × 0.294 mm
Contrast	700:1
Frame rate	29.97 fps
Antialiasing	No
Refresh rate	75 Hz
Height	33.4 cm
Width	40.5 cm

注：この件で用いられた液晶シャッター眼鏡は、シャープの製品である。このシャッターは、明るい場合と暗い場合の透過する輝度の比は、1000 倍以上であった。したがって、クロストークの影響は無視しうると考えられる。

Fujine (藤根俊之・シャープ) ら^{17), 18)}は、ディスプレイの視距離は、ディスプレイの縦の長さの 3 倍以上が必要であることを示唆した。我々は、実験手順の中で、この勧奨に従うことを決めた。表 1 に示したように、モニターの高さは 33.4cm であり、すなわち、1m (視距離) の長さに対して 3 分の 1 だった。被験者にとっての輻輳角は、もっとも近い距離 (被験者から約 45 cm であり、被験者の瞳孔間距離を 65 mm と仮定した場合) で 8.2 度であった。最も遠い位置 (上記の瞳

孔間距離を仮定して、被験者から 1 m 離れた) にバーチャルな球体が移動すると、その場合の輻輳角は、3.7 度であった。

各被験者が 40 秒間動く球体をみているときに、4 項目の測定が、被験者に対して行われた。この 40 秒間に、被験者は仮想視標の中心を見つめるように指示され、その後、彼らの調節と輻輳が測定された。実験環境の照度は最初の実験と同様であった。モニターの上でも 3 D 動画の球体の輝度は、最初の実験とは、わずかに変化していた。仮想視標 (球体) が被験者から最も遠いときには、 3.6 cd/m^2 であり、最も接近しているときには、 3.1 cd/m^2 であった。スクリーン背景の輝度は 10.8 cd/m^2 であった。

3 結果

本研究では、被験者が両眼視によって、実物のターゲットと 3 D 動画のターゲットを見つめているときの被験者の調節と輻輳を同時測定した。これらの測定の結果は、すべての被験者で、おおむね類似していた。

3. 1 実物の視対象物に対する水晶体調節と輻輳の同時測定

本実験の結果を図 9 と図 10 に示す。さらに全被験者の平均は、図 11 で見ることができる。これらの図のすべてでは、「調節」は、水晶体調節の焦点距離を指す。また、「輻輳」は輻輳焦点距離を指す。また、「球体」は、視対象物の位置を指す。これらの図が示すことは、被験者の調節と輻輳は、一致しているということである。ジオプターの値の変化は、10 秒周期で起きていた。さらに、ジオプターの値は、被験者からターゲットまでの距離にほぼ一致していた。

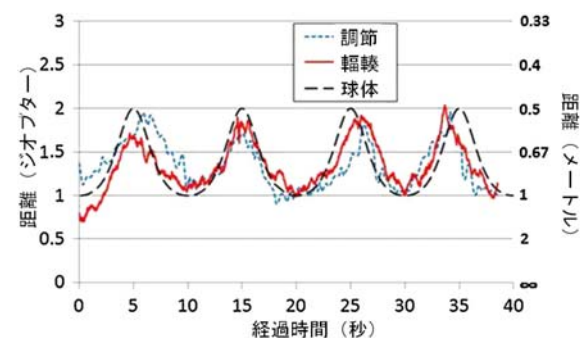


図 9. 実物の視対象物に対する水晶体調節と輻輳の同時測定を行なった被験者の典型例 (22 歳男性)

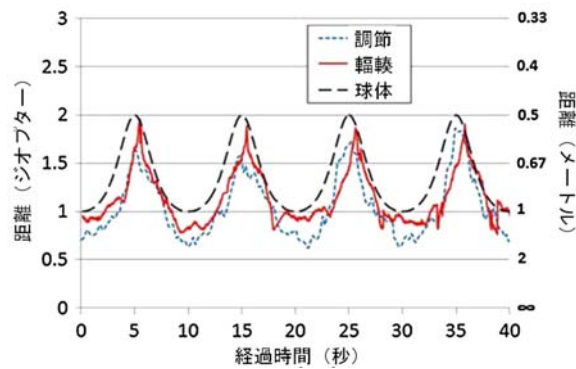


図 10. 実物の視対象物に対する水晶体調節と輻輳の同時測定を行なった被験者の典型例 (25 歳男性)

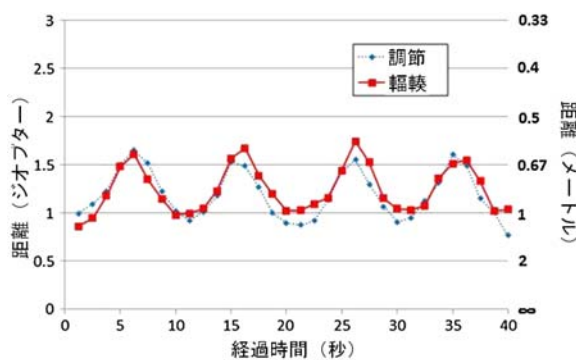


図 11. 実物の視対象物に対する水晶体調節と輻輳の同時測定結果 全被験者の平均値 (6 名: 20~37 歳)

3.2 3D 動画に対する水晶体調節と輻輳の同時測定

本実験の結果を図 12 と図 13 に示す。さらに全被験者の平均は、図 14 で見ることができる。これらの図のすべてでは、「球体」は、3D 動画の中の球体の仮想位置を指す。また、図 12 と図 13 で、「調節」および「輻輳」は、水晶体調節の焦点距離と輻輳焦点距離をそれぞれ指す。図 14 では、「調節」および「輻輳」は、水晶体調節と輻輳焦点距離をそれぞれ指す。

これらの図において、3D 動画のバーチャルな最近点は被験者の瞳孔間距離の違いによってわずかに異なった。図 12 では、もっとも近いポイントは 44 cm、すなわち 2.3 D だった。なぜなら、この被験者の瞳孔間距離は 63 mm だったからである。図 13 では、もっとも近いポイントは 47.5 cm だった。なぜなら、この被験者の瞳孔間距離は 68 mm だったからである。これらの数値から、被験者の調節と輻輳は、ほぼ一致して変動していることが示されている。ジオプトリーの値は、10 秒周期で変化していた。さらに、値は、被験者から 3D 動画の仮想位置までの距離にほぼ一致していた。調節と輻輳の間の一致は、図 14 で示されている。被験者のうち、3D 映像がボケているという報告をしたものはいなかった。

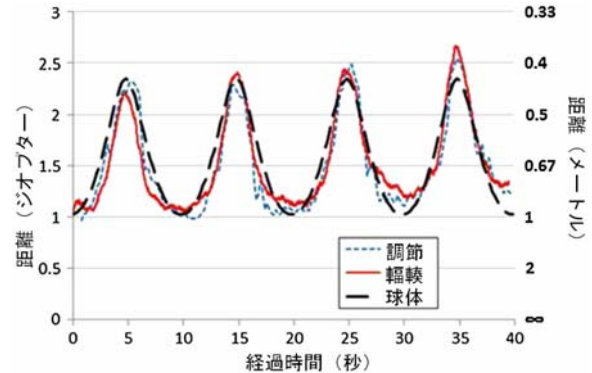


図 12. 3D 動画に対する水晶体調節と輻輳の同時測定を行なった被験者の典型例 (23 歳男性: 瞳孔間距離 63 mm)

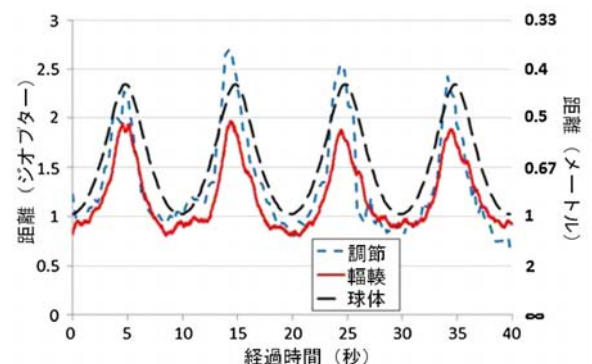


図 13. 3D 動画に対する水晶体調節と輻輳の同時測定を行なった被験者の典型例 (25 歳男性: 瞳孔間距離 68 mm)

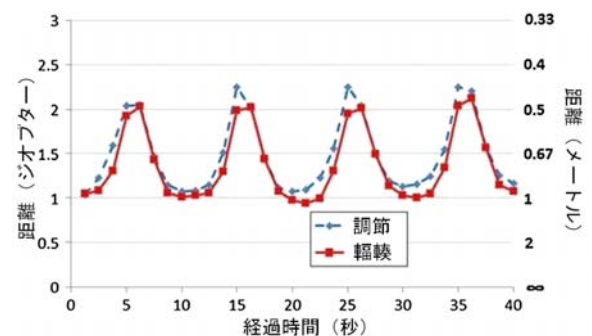


図 14. 3D 動画に対する水晶体調節と輻輳の同時測定結果 全被験者の平均値 (6 名: 20~37 歳)

4 本論文のインパクト (考察)

4.1 実物の視対象に対する水晶体調節と輻輳の同時測定

この実験では、WAM-5500 オートレフ・ケラトメーターが、各被験者の調節力の正確さを検証するために使用された。WAM-5500 が $-0.01D \pm 0.38 D$ という正確さを示したことは、以前に実験的に示されてきた。そして、この機器は、 $-6.38 D$ から $+4.88 D$ の範囲

で測定が可能である¹⁴⁾。WAM-5500 は、調節力値に基づいて、眼疲労や一過性近視^{19), 20)}の研究においても使用された。さらに、WAM-5500 は、近業作業条件のもとでの水晶体調節反応の研究や、一年がかりの視覚不快感の研究^{21), 22)}においても使用され、その信頼性は十分であることが明らかとなった。

アイマークレコーダEMR-9がこの研究の中で使用されたが、この機器は過去のさまざまなタイプの研究で使用されてきた。例えば、Egami（江上千代美：福岡県立大学・久留米大学小児科）らは、被験者の眼球運動について、年齢別、眼精疲労の有無、あるいは、数種類の絵を見せた後の学習効果など、研究した¹⁵⁾。Sakaki（榊泰輔・九州産業大学）¹⁶⁾ は、アイマークレコーダから得られた一瞬のデータから、人間の眼球運動を予測し、サポート・ロボットの操作をよりよく人間をサポートする方向で改善する研究をした。このように多くの研究者が、さまざまな視覚課題に対して、この機器の遂行能力や特性を利用して研究してきた。

本研究において、我々は被験者が実物体を見ているときの調節と輻輳の焦点距離を測定した。我々は、瞳孔間距離に基づいて、両眼が協調したデータから輻輳焦点距離を計算した。

水晶体は、加齢とともに弾力を失い、また、その屈折力も減少する。臨床的に測定された遠近調節力（それは眼の調節力の真のジオプリーの変化、および視覚の焦点深度の両方を含んでいる）は、かなりはつきりと減少し、16歳の13Dの調節力から、50歳またはそれ以上の年齢の2Dまで、低下する^{23), 24)}。

強度の近視、遠視、その他の屈折異常などを有していると正確な調節力は測定できない。しかし、今回の実験の被験者には、そういう異常のある人はいなかった。したがって、被験者は全員、実物の視対象物＝テニスボールに対してピントを合わせたに違いない。

さらに、輻輳は、輻輳能力の欠如、輻輳の外眼筋麻痺、あるいは、その他の病的条件でも不可能となりうる²⁵⁾⁻²⁷⁾。しかし、被験者にはだれもそういう症状を持ったものはいなかった。したがって、もし我々の測定が正確に行なわれたならば、調節と輻輳の焦点はともに、実物の視対象物の位置に合っていたであろう。

本実験の結果が示したことは、被験者の調節と輻輳は、被験者がもっとも近いポイントと、もっとも遠いポイントの間で動いている視対象物を注視しているとき、両方ともその場所に、変動するということである。さらに、これらの変動は一定のサイクルで視対象物の動きに合わせて生じていた。したがって、被験者は両眼視で対象物を注視し、また、我々はその結果を測定することができた。

これらの調節の焦点距離は、被験者から視対象物までの距離にほぼ一致していたが、それらはしばしば視対象物をほんの少し超えたところに位置していた。これは、調節焦点が被写界深度のために正確でない場合があり、そういうふうに被験者が対象を見ているという事実から生じるのかもしれない。被写界深度は個々人が（一定の屈折力のもとで）はつきり見ることができる範囲（許容範囲）である。また、それは従来から長い年月、さまざまな面を研究されてきた。被写界深度および瞳孔径は相互に関連している。それらは、環境の照度に応じて変わることが分かった^{10), 28), 29)}。こ

の点において、本研究の所見は、我々のかつての研究の所見^{8), 24)}とほぼ一致することが明らかになった。それは水晶体が約 0.4D程度、厳密な値から調節のピントがずれるかもしれないことを示している。

結論として、被験者が視対象物を見つめるとき、調節と輻輳を同時に測定することは可能であった。現在の測定法は視機能の測定のために有効な技術であり、正確な測定値が、たとえ立体視しているときでも得ることができる。この実験ステップに続いて、この後、記述されるように、我々は立体映像に対する水晶体調節および輻輳の同時測定を次に行なった。

4.2 3D動画に対する水晶体調節と輻輳の同時測定

Hoffman（カリフォルニア大学バークリー校 M.S. Banks教授のグループ）らは、調節と輻輳の間には矛盾があると述べた⁶⁾。彼らの論文によれば、3D映像を見ているとき、水晶体調節はディスプレイの位置に固定されている。しかしながら彼らの実験は、視距離が非常に短い（30 cm）ものを使用したので、被写界深度は浅くなった。Shibata（柴田隆史・東京福祉大学、前早稲田大学河合隆史グループ。この論文は、バークリーのBanks, Hoffman らとの共著）らは、さらに調節と輻輳の間の矛盾を報告した³⁰⁾。彼らの実験の刺激は、ランダムドット・テレレオグラムで、縦縞（たてしま）の深さのある縞模様であった。彼らは独特の検査刺激を用いた。すなわち、空間周波数で変調された小さな振幅の（縞の）奥行き刺激であった。その振幅は小さかった（最高最低間の視差は4分、すなわち15分の1度であった。また、空間周波数（視野角1°当りの縞の繰り返し数）は高かった（視野角1度当たり1サイクル、1.4サイクル、2サイクル）であった。彼らの刺激は2枚の静止画像の平面上に表示され、1.2D（83 cm）離されて置かれた。このように、彼らの研究（Banks, Hoddman, Shibataら）はどれも、被験者の水晶体調節や輻輳は実際には測定していなかった。他方で、我々の今回の研究はそれらを測定した。対照的に、我々は今回の実験において、パワー3D（オリンパス・メモリーワークス、東京都渋谷区笹塚）を刺激に使用した。この映像技術は異なる焦点距離および異なる輻輳角に対応する多数の焦点面に表示することができる。パワー3Dは、人間の眼の性質を考慮して作られた非常に自然なダイナミックの動く動画を表示する。したがって、あたかも映像が本物の動いている視対象物であるかのように、本実験における人工の3Dに対する水晶体調節は、変動する視標の仮想位置に近い位置に追従した。

他の研究者^{2), 3), 31), 32)}は、調節－輻輳のミスマッチが眼疲労や眼の不快感などの問題を引き起こし、それは、調節と輻輳の間の乖離が原因となると報告した。しかし、今回の実験で我々は調節と輻輳との間に、少なくとも若年被験者を用いる場合には、ミスマッチは存在しなかった。

我々の従来の研究によれば、調節は、実物の視対象物に厳密には合わず、わずかに視対象物の後方の位置にフォーカスを合わせる^{8), 33)}。（このことは、バーチャ

ルな映像の場合にも言える。)我々のかつてのこれらの研究は、若い被験者の視対象物の後方への調節のギャップが 0.4D 以内であったことを示した。今回の実験におけるギャップも、やはり、この範囲内であった。本研究で、被験者が 3D 動画を見たとき、調節と輻輳は、3D 動画の仮想位置とほぼ一致した。

Patterson⁹⁾は、調節－輻輳矛盾は、近接ディスプレイ(被験者と画面との間の視距離が近い)特有の問題のはずであり、その他の、そう近くないほとんど全ての立体ディスプレイにとっての看視条件のもとでは、被写界深度のおかげで、そういう問題(調節－輻輳矛盾)は起きないであろうと報告した。

人間の被写界深度の知覚に影響する 2 つの要因は瞳孔径と解像度である⁹⁾。瞳孔径が輝度の上昇によって直線的に縮小するとともに、人間の被写界深度は変化する^{34), 35)}。瞳孔径は、0.03 cd/m²の輝度レベルに対しては 6 mm を少し超えるくらいであり、300 cd/m²の輝度レベルに対しては約 2 mm の大きさになるであろう。瞳孔径が 1 mm 縮小するごとに、被写界深度は約 0.12 ジョブトリー増加する^{9), 11)}。被写界深度は、空間周波数によっても影響を受ける。Ogle と Schwartz は、焦点深度のトータルな範囲は、視標の視角が 0.25 分増加すると、約 0.35 ジョブトリー増加することを見つけた。この 2 人の研究者は、焦点深度のトータルな範囲は、1.0 分の視標に対して平均 0.66 ジョブトリーであり、2 分の視標に対して 2.0 ジョブトリーであることを示した。

Patterson⁹⁾は、焦点深度の幅(鮮明に見える範囲)は平均で約 1.0 ジョブトリーのオーダーであると述べた。したがって、注視点が 0.5m である場合、被写界深度のトータルな範囲は注視点の約 0.1m 手前の位置(2.5D)から、注視点の後ろ 0.17 m の距離(1.5D)までである。注視点が 1m に対しては、被写界深度の範囲は注視点の手前、約 0.33 m の位置(1.5D)から、注視点の背後に約 1 m の距離(0.5D)までであろう。注視点が 2 m に対しては、被写界深度の範囲は注視点の手前、約 1.0 m の距離(1D)から、注視点の背後に無限遠(0D)までであろう。Wang¹²⁾らは、加齢とともに瞳孔径が縮小するので、加齢によって被写界深度が増加したことを示した。彼らによれば、若年の観察者の被写界深度に関する典型的な値は、おおむね 0.8D から 1.2D である。今回の研究において、映像がボケて見えると報告した被験者はいなかった。これは、被験者が 3D 映像を見ているときに、ターゲットが被写界深度の範囲の中に設定されたからかもしれない。

Patterson⁹⁾および Patterson と Silzars³⁶⁾は、立体表示を見ることに伴う眼疲労と見ることの不快感は、両眼視差の存在する一方で、運動視差が欠如していることのハイ・レベルな葛藤から生まれるのではないかと、この説を提案した。

今後、我々は、このハイ・レベルな矛盾が、3D 映像を見ている人の視覚疲労、3D 酔い、あるいはその他の不快感に貢献するのか、より詳しく研究して行きたい。

5 結語

本研究において、我々は被験者が実物体を見ているときの水晶体調節と輻輳の両方を同時に測定することができた。これらの方法を使用して、我々は被験者が 3D 動画を見ているときの調節と輻輳焦点距離を測定した。結果は、若い被験者が 3D 動画を見ているときに調節と輻輳の間に、解離はほとんど存在しなかった。どの被験者も仮想位置に焦点を合わせて際に、映像がボケているようには見えなかった。Patterson の発見した所見と、関連した研究に基づくならば、調節－輻輳の間にミスマッチがないときに(調節のフォーカスが画面から離れていて、バーチャルな位置に合っている)、ボケた映像とならなかったことは、調節の変動が被写界深度の範囲内にあったという仮説によって説明できるであろう。

次には被験者の調節の手がかりに影響する別の方法で、水晶体調節が影響されることはありえる。例えば、ルービック・キューブの立方体の先端は、球体より明瞭な調節の手がかりとして用いられるかもしれない。我々は、この件の研究を今後行っていくことを計画している。さらに我々は、立体映像のメカニズムを包括的に理解するために、視対象物の運動速度について研究することが必要であり、また、環境の照度を変化させて検討する必要があるであろう。

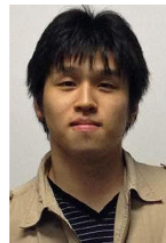
謝辞

本研究は日本学術振興会(JSPS) 科研費(B) 24300046 と 23300032 の補助を受けて実施された。

参考文献

- 1 M. Lambooy et al., "Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review," J. Imaging Sci. Technol. 30201-1-30201-14, 53, 03 (2009).
- 2 F. M. Toates, "Accommodation function of the human eye," Physiol. Rev. 52, 828–863 (1972).
- 3 F. M. Toates, "Vergence eye movements," Doc. Ophthalmol. 37, 153–214 (1974).
- 4 A. Cho et al., "A study on visual characteristics binocular 3-D images," Ergonomics 39, No. 11, 1285–1293 (1996).
- 5 R. Sierra et al., "Improving 3D imagery with variable convergence and focus accommodation for the remote assessment of fruit quality," SICE-ICASE Int. Joint Conf. 2006, 3554–3558 (2006).
- 6 D. M. Hoffman et al., "Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue," J. Vis. 8, No. 3, 1–30 (2008).
- 7 K. Ukai and P. A. Howarth, "Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: background, theories, and observation," Displays 29, No. 2, 106–116 (2008).
- 8 M. Miyao et al., "Visual accommodation and subject performance during a stereographic object task using liquid crystal shutters," Ergonomics 39, No. 11, 1294–1309 (1996).

- 9 R. Patterson, "Human factors of stereo displays: an update," *J. SID* 17, No. 12, 987–996 (2009).
- 10 F. W. Campbell, "The depth of field of the human eye," *Int. J. Optics* 4, No. 4, 157–164 (1957).
- 11 K. N. Ogle and J. T. Schwartz, "Depth of focus of the human eye," *J. Opt. Soc. Am.* 49, 273–280 (1959).
- 12 B. Wang and K. J. Ciuffreda, "Depth of focus of the human eye: theory and clinical applications," *Surv. Ophthalmol.* 51, 75 (2006).
- 13 A. Queiro's et al., "Influence of fogging lenses and cycloplegia on openfield automatic refraction," *Ophthalm. Physiol. Opt.* 28, 387–392 (2008).
- 14 A. L. Sheppard and L. N. Davies, "Clinical evaluation of the Grand Seiko auto ref/keratometer WAM-5500," *Ophthalm. Physiol. Opt.* 30, 143–151 (2010).
- 15 C. Egami et al., "Developmental characteristics of visual cognitive function during childhood according to exploratory eye movements," *Brain Dev.* 31, 750–757 (2009).
- 16 T. Sakaki, "Estimation of intention of user arm motion for the proactive motion of upper extremity supporting robot," *Rehabilitation Robotics*, 2009. *Proc. ICORR 2009. IEEE Int. Conf.*, 486–490 (2009).
- 17 T. Fujine et al., "Real-life in-home viewing conditions for flat panel displays and statistical characteristics of broadcast video signal," *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, No. 3B, 1358–1362 (2007).
- 18 T. Fujine et al., "The relationship between preferred luminance and TV screen size," *Proc. SPIE* 6808, 68080Z-1-12 (2008).
- 19 C. Tosha et al., "Accommodation response and visual discomfort," *Ophthalm. Physiol. Opt.* 29, 625–633 (2009).
- 20 E. Borsting et al., "Measuring near-induced transient myopia in college students with visual discomfort," *Amer. Acad. Opt.* 87, No. 10, 760–766 (2010).
- 21 C. Chase et al., "Visual discomfort and objective measures of static accommodation," *Optom. Vis. Sci.* 86, No. 7, 883–889 (2009).
- 22 E. Borsting et al., "Longitudinal study of visual discomfort symptoms in college students," *Optom. Vis. Sci.* 85, No. 10, 992–998 (2008).
- 23 M. Dubbelman et al., "Changes in the internal structure of the human crystalline lens with age and accommodation," *Vision Res.* 43, No. 22, 2363–2375 (2003).
- 24 C. Ramsdale and W. N. Charman, "A longitudinal study of the changes in the static accommodation response," *Ophthalmic Physiol. Opt.* 9, No. 3, 255–263 (1989).
- 25 M. W. Rouse et al., "Validity and reliability of the revised convergence insufficiency symptom survey in adults," *Optom. Vis. Sci.* 80, No. 12, 832–838 (2003).
- 26 M. Scheiman et al., "A survey of treatment modalities for convergence insufficiency," *Optom. Vis. Sci.* 79, No. 3, 151–57 (2002).
- 27 K. Ohtsuka et al., "Accommodation and convergence palsy caused by lesions in the bilateral rostral superior colliculus," *Am. J. Ophthalmol.* 133, No. 3, 425–427 (2002).
- 28 W. N. Charmana and H. Whitefoota, "Pupil diameter and the depth-of-field of the human eye as measured by laser speckle," *Int. J. Optics* 24, No. 12, 1211–1216 (1977).
- 29 S. Marcosa et al., "The depth-of-field of the human eye from objective and subjective measurements," *Vision Res.* 39, No. 12, 2039–2049 (1999).
- 30 T. Shibata et al., "The zone of comfort: predicting visual discomfort with stereo displays," *J. Vis.* 11, No. 8, 1–29 (2011).
- 31 R. Patterson et al., "Perceptual issues in the use of head-mounted visual displays," *Hum. Factors* 48, 555 (2006).
- 32 M. Velger, "Helmet-Mounted Displays and Sights," Boston: Artech House (1998).
- 33 Y. Otake et al., "An experimental study on the objective measurement of accommodative amplitude under binocular and natural viewing conditions," *Tohoku J. Exp. Med.* 170, 93–102 (1993).
- 34 I. E. Loewenfeld, "The Pupil: Anatomy, Physiology and Clinical Applications," Ames: Iowa State University Press (1993).
- 35 P. Reeves, "The response of the average pupil to various intensities of light," *J. Opt. Soc.* 42, 35–43 (1920).
- 36 R. Patterson and A. Silzars, "Immersive stereo displays, intuitive reasoning, and cognitive engineering," *J. SID* 17, No. 5, 443–448 (2009).



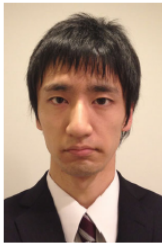
塩見友樹は名古屋大学の博士課程の院生であり、2013年3月25日にPhDの学位を授与された。彼の研究は幅広い人間工学であるが、とくに人間の視覚機能の視点からの立体視研究に焦点を合わせている。彼の最近の関心は立体視における調節と輻輳の関連であり、そのため両方の同時測定の研究を行った。彼は2013年4月1日に大学から労働基準監督官として、労働監督行政に異動した。したがって本論文についての質問やコメントは宮尾博士に直接送っていただきたい。



上本啓太は、名古屋大学大学院情報科学研究科情報システム学専攻宮尾研究室の院生である。彼は、2013年3月25日に修士号を授与された。彼は立体視における見え方のボケの影響の研究を一貫して行ってきた。彼は、背景の異なった映像が焦点を合わせるための筋肉のリラックスに与える影響かどうかについても研究してきた。



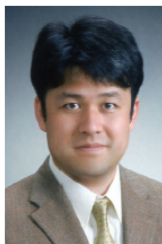
小高健仁は、名古屋工業大学大学院工学研究科で2012年に修士号を授与された。同年、彼は名古屋大学大学院情報科学研究科博士課程に入学した。今日、彼はモバイル・ディスプレイの環境照度と可読性の研究をしている。



佐野峻太は、名古屋大学大学院情報科学研究科情報システム学専攻宮尾研究室の院生である。彼は、2013年3月25日に修士号を授与された。彼は、種々の環境下での電子ペーパーの見やすさと可読性や、3Dディスプレイの研究をしており、年齢に関連して照明がどのような影響を与えるか研究している。



石尾広武は、1985年に京都大学大学院理学研究科理論物理学専攻で、PhDを授与された。2011年から福山市立大学都市経営学部の教授として勤務している。彼の主たる研究は、カオスの研究、計算機物理学、そしてヒューマン・コンピュータ・インタラクションである。



高田宗樹は、博士（数学）の学位を有し、福井大学大学院工学研究科の准教授である。幅広く、彼の研究は数値物理学に基礎をおいている。とくに、確率過程理論である。この理論的背景を応用に用いて、予防医学のための環境生理学の研究に満喫している。彼は生体信号の非線形分析に関心がある。IEEEメンバーであり、こうした分野のプログラム委員にも就任している。学会誌Formaの副編集長をはじめ、複数の国際誌のエディターを務めている。



渡邊智之は、名古屋大学大学院医学系研究科でPhDを授与された。現在、彼は愛知学院大学の准教授である。彼の研究への関心は、とくに疫学と老年科学である。今日、彼はドライブレコーダーやさまざまなディスプレイを用いて、認知症を有する老人、健康老人双方の自動車運転と運転技能の評価に関する研究をしている。



宮尾克は、1985年に名古屋大学大学院医学研究科でPhDを授与された。1977年に名古屋大学で医学士を授与された。1977年に医師免許を取得した。現在、彼は名古屋大学大学院情報科学研究科教授である。彼の専門分野は人間工学と産業医学であり、最近の研究は3D映像ディスプレイや電子ペーパーのヒューマンインタフェースに中心をおいている。