

VR 体験における主体感の定量的評価

Quantitative Evaluation of the Sense of Agency in Virtual Reality

○佐藤優太*, 杉田典大*, 齋藤晃羅*, 小宮山拓見*, 吉澤誠*

○Yuta Sato*, Norihiro Sugita*, Akira Saito*,
Takumi Komiyama*, Makoto Yoshizawa*

*東北大学

*Tohoku University

キーワード : 主体感 (Sense of Agency), バーチャルリアリティ (Virtual Reality), 追跡眼球運動 (Smooth pursuit eye movement), 手-眼協調 (Oculo-manual coordination), 内部モデル (Internal model)

連絡先 : 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 東北大学工学研究科・工学部サイバーフィジカルシステム研究室

佐藤優太, Tel.: 022-795-7130, E-mail: sato.yuta.q3@dc.tohoku.ac.jp

1. 序論

近年, 医療やリハビリテーション分野において, バーチャルリアリティ (Virtual Reality:VR) の応用が拡大している. 特に脳卒中患者の上肢機能回復において, VR 空間での身体知覚を利用した介入の有効性が報告されている¹⁾. このような VR 環境下において, 自身の運動で外部の事象を制御しているという感覚である「主体感 (Sense of Agency)」は, 患者の自己効力感を高め, 治療への積極的な参加を促す上で不可欠な役割を担っている²⁾.

主体感の発生機序は, 内部順モデルが予測する感覚フィードバックと実際の感覚入力との比較に基づくコンパレータモデル (Comparator Model) によって説明されることが多い³⁾. 現在, 主体感の評価にはリッカート尺度を用いた主観的評価が一般的であるが, 個人の主観に依存するため時間的・定量的な変化の取得が困難

である. 一方で, 脳波などの客観的評価指標も提案されているが, 計測コストや計測環境の制約から, VR リハビリテーションのような実環境への適用には課題が残る. そのため, 非侵襲かつ連続的に取得可能な客観的評価指標の確立が求められている.

そこで本研究では, 非侵襲的かつ連続的な計測が可能であり, 主体感の発生機序を説明するコンパレータモデルと理論的整合性が高い「眼球運動」に着目する. 眼球運動は, フィードバック制御や予測処理という主体感の制御機構に関連する生体機構である. 近年, 視線計測機能を搭載したヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display:HMD) の普及に伴い, 特別な外部機器を必要とせず VR 利用中における詳細な眼球運動解析が容易になったことから, 眼球運動特性の解析により主体感の定量的評価を行うことが出来る可能性が考えられる.

本研究の目的は, 後述する眼球運動特性が主

体感の主観評価と関連するという仮説に基づき、その妥当性を検証することである。具体的には、手-眼球協調モデルを基盤とした眼球運動推定モデルを構築し、VR内で実施する腕振り課題において得られる視線運動特性と主体感の主観評価との関係を検討する。これにより、眼球運動指標が主体感の変化を反映し得るかを明らかにすることを旨とする。

2. 関連研究

2.1 主体感とその評価手法の問題点

主体感とは、自らの行為およびそれを通じて外界の出来事を制御しているという経験を指す⁴⁾。「その行為を生じさせているのが自分であるという感覚」とも定義され、身体が自分のものであるという身体所有感覚 (Sense of Body Ownership) とは独立して成立する概念である⁵⁾。この主体感の発生機序を説明する代表的な理論が Fig. 1 に示すコンパレータモデルである³⁾。このモデルでは、運動指令が発せられる際に内部順モデルがその感覚的結果を予測し、実際の感覚フィードバックと比較される。自己生成運動に対する感覚応答の減衰が報告されるように、両者の一致度が主体感の強度に寄与すると考えられている³⁾。



Fig. 1 コンパレータモデル (文献³⁾を基に作成)

主体感の評価手法としては、5件法や7件法のリッカート尺度を用いた主観的評価が広く用いられており、主体感尺度 (Sense of Agency Scale) などの自己報告尺度も開発されている⁶⁾。しかし、これらは内省報告に依存するため、連続的な運動中の時間的・定量的な変化を高い分解能

で捉えることは困難である。また、暗黙的な評価指標としてインテンショナルバインディング (Intentional binding) が提案されているが⁷⁾、主にボタン押しなどの離散的行為を対象としており、連続運動タスクへの適用には限界がある。一方、脳波を用いた客観的評価指標は理論的妥当性が高いものの⁸⁾、運動課題中のアーチファクトやノイズの影響を受けやすく、高コストであるためVRリハビリテーションなどの実環境への適用には大きな制約がある。

さらに、連続的な運動課題では予測誤差が時間的に変動し、主体感も動的に変化する可能性がある。視覚フィードバックの遅延や増幅率を操作することで人工的に予測誤差を生じさせ、主体感を変化させる研究は行われているが^{9, 10)}、その多くは限定的な運動課題に基づいており、連続運動中の動的特性の理解が十分とは言えない。

2.2 追跡眼球運動と予測制御機構

追跡眼球運動は、ゆっくりと動く視覚対象物の網膜像を中心窩に維持し、視線を滑らかに動かす随意性眼球運動である¹¹⁾。SPEMは視標速度に対する眼球速度の比である利得によって評価され、理想的な状態では利得は1に近づく。しかし、視覚処理には約100 msの遅延が存在するため、網膜上の速度誤差に基づく純粋なフィードバック制御のみでは、高速かつ安定した追跡を説明することが困難である¹²⁾。

この時間遅延を補償するため、実際の追跡眼球運動には内部モデルに基づく予測制御が関与している。周期的に運動する視標に対して方向転換に先行して眼球運動が開始される現象や、視標の一時的な消失時にも追跡が継続する現象がその証拠である¹³⁾。神経基盤としては、小脳が内部モデルの形成および予測制御に重要な役割を果たすと考えられている¹⁴⁾。

2.3 手-眼球の協調運動

日常的な運動において眼球運動と上肢運動は密接に協調しており、自己生成運動の状況では運動指令に伴う遠心性コピー（Efference copy）が感覚予測に利用される¹⁵⁾。Gauthier らは、Fig. 2 に示す手-眼球協調運動モデルを提唱し、手で操作される視標を追跡する課題において、手運動情報が眼球運動の予測成分に寄与することを報告している¹⁶⁾。自己生成された視標に対しては、外的に提示された視標に比べて追跡の利得が向上することが確認されており、これは手運動に関する内部情報が追跡眼球運動の制御に統合されていることを示している。

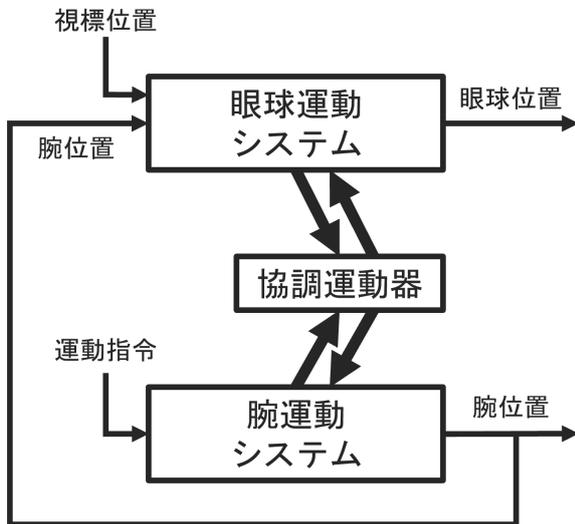


Fig. 2 手-眼球協調モデル (文献¹⁶⁾を基に作成)

手運動と眼球運動は、小脳を含む共通の神経回路によって予測的な調整を受けている。すなわち、腕運動に伴う遠心性コピーは追跡眼球運動の生成過程で利用されており、このような手-眼球協調における予測的側面は、自己生成運動の感覚的帰属である主体感の発生機序と深く一致する。したがって、手運動情報を入力とした追跡眼球運動モデルを構築し、予測経路の寄与を解析することは、主体感の定量的評価に向けた有効なアプローチとなり得る。

3. 提案モデルの構築

本研究では、主体感推定を目的として、腕運動情報を入力とし、眼球位置を出力する Fig. 3 に示す追跡眼球運動モデルを構築する。本モデルは、視覚誤差に基づくフィードバック経路と、腕運動の遠心性コピーに基づく予測経路を統合した構造を有し、両者の寄与によって生成される追跡眼球運動を記述する。

3.1 視覚フィードバック経路

視覚フィードバック経路は、仮想空間内に提示された手の位置 $H_{VR}(t)$ と眼球の位置 $E(t)$ との位置誤差に基づく負帰還制御系である。視覚系に入力される位置誤差 $e(t)$ は、式 (1) で与えられる。

$$e(t) = H_{VR}(t) - E(t) \quad (1)$$

視覚情報処理には約 100 ms の知覚遅延 τ が存在するため、制御器に入力される誤差信号は $e_d(t) = e(t - \tau)$ となる。この誤差に対する視覚コントローラ $C_{vis}(s)$ を、比例・積分・微分補償を行う PID 制御器として式 (2) のように定式化する。

$$C_{vis}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2)$$

ここで、 K_P , K_I , K_D はそれぞれ比例、積分、微分ゲインである。これにより生成される視覚コマンドは $U_{vis}(s) = C_{vis}(s)E_d(s)$ となる。

3.2 遠心性コピーに基づく予測経路

知覚遅延を含む系において高速かつ滑らかな追跡を実現するため、本モデルでは、先行研究¹⁷⁾より協調運動器をスミス予測器 (Smith predictor) としてモデル化し、予測的補償機構を導入する。現実の手の位置 $H(s)$ を入力とし、内部モデルを通じて将来の眼球位置を予測することで、予測コマンド $U_{pred}(s)$ を生成する。

$$U_{pred}(s) = C_{coord}(s)H(s) \quad (3)$$

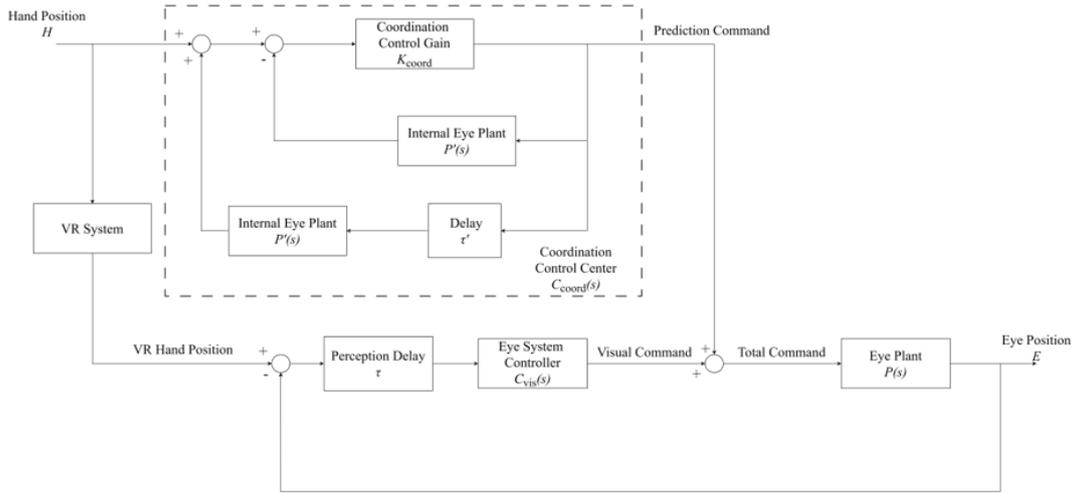


Fig. 3 主体感推定を目的とした追跡眼球運動モデルのブロック線図

ここで協調制御器 $C_{\text{coord}}(s)$ は、予測パラメータ K_{coord} 、眼球プラントの内部表現 $P'(s)$ 、および遅延の内部表現 τ' を用いて式 (4) のように表される。

$$C_{\text{coord}}(s) = \frac{K_{\text{coord}}}{1 + K_{\text{coord}}P'(s)(1 - e^{-\tau's})} \quad (4)$$

最終的な眼球運動指令 $U_{\text{total}}(s)$ は、視覚コマンドと予測コマンドの和 ($U_{\text{total}}(s) = U_{\text{vis}}(s) + U_{\text{pred}}(s)$) として形成され、眼球プラントに入力される。

3.3 眼球プラントと VR システム

眼球プラント $P(s)$ は、眼球本体の慣性特性および外眼筋の粘弾性特性を反映する線形二次遅れ系として式 (5) でモデル化する¹⁸⁾。

$$P(s) = \frac{1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (5)$$

本研究では先行研究に基づき、時定数を $T_1 = 0.22$ 、 $T_2 = 0.013$ に固定し、予測信号生成の変化に焦点を当てる。

また、VR システムは現実の腕運動 $H(t)$ を、増幅係数 G を用いて仮想手位置 $H_{\text{VR}}(t)$ へ変換する ($H_{\text{VR}}(t) = G \cdot H(t)$)。この増幅係数 G を操作することで、被験者の遠心性コピーに基づく内部予測と実際の視覚結果との間に不一致を生じさせ、主体感を段階的に操作する。

3.4 実験の仮説

自己生成運動において、内部予測と実際の感覚入力的一致は主体感の形成に重要である。スミス予測器構造を持つ本モデルにおいて、予測経路の寄与を表すパラメータ K_{coord} が低下すれば、内部予測と視覚結果の整合性が低下し、主体感が弱まる。逆に、予測経路が適切に機能している場合は主体感が強く知覚されると考えられる。したがって、パラメータ K_{coord} の変化を同定することにより、主体感の定量的な推定が可能になると仮定する。

4. 腕振りタスクを用いた評価実験

4.1 実験環境および課題

Fig. 4 に示す通り、被験者は椅子に着座して頭部を固定し、視線計測機能を搭載した HMD (FOVE 0, サンプリング周波数 120 Hz) を装着した。VR 映像の構築には Unity を使用し、被験者の腕運動および頭部位置はモーションキャプチャシステム (OptiTrack Flex 13, 120 Hz) を用いて取得した。

被験者に提示する VR 映像は Fig. 5 に示す通りである。VR 空間内には追従対象として半透明の赤色球を提示した。この球は正面方向を中

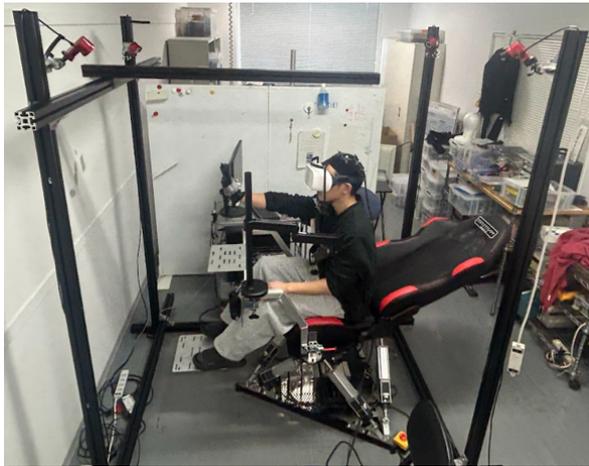


Fig. 4 実験装置図

心として半径 1 m の距離に配置され、水平方向に -30° から 30° の範囲を周波数 0.2 Hz の正弦波軌道で往復運動する。被験者には、この赤色球の運動に合わせて右腕を水平方向に往復運動させ、VR 空間内に表示される仮想右手が赤色球と同一の軌道を描くように指示した。

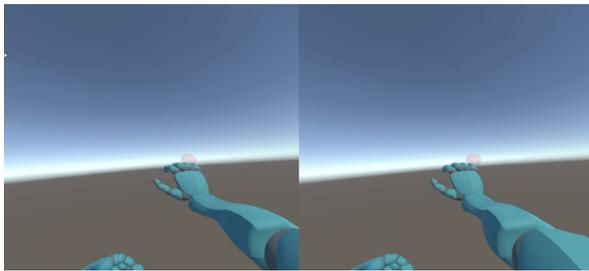


Fig. 5 提示 VR 映像の例

4.2 実験手順

まず、視覚制御同定実験として、増幅係数 $G = 1.0$ の一致条件にて右腕を自発的に動かさず試行を行った後、その運動データを再生した映像を腕を動かさずに眼球のみで追跡する試行を実施した。これは、遠心性コピーを含まない眼球運動データを取得し、視覚コントローラの PID ゲインを推定するための基準データである。

その後、被験者（20 代男性 5 名）に対し、増幅係数 $G \in \{0.50, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0\}$ の 5 条件で腕振りタスクを実施した。順序効果を最小化する

ため、条件の提示順はラテン方格法に基づいて割り当てた。1 試行 20 秒の各条件の終了後、「提示された仮想右手の動きを、自分自身の動きとして感じた程度」について、7 段階のリッカート尺度で主体感の主観評価を行った。

4.3 データ解析手順

取得したデータのうち、運動開始直後の過渡応答を避けるため後半 10 秒間を解析対象とした。眼球速度が 600 deg/s を超える成分を瞬目やサッカド由来の外れ値として除外して pchip 補間を行い、カットオフ周波数 8 Hz の二次 Butterworth フィルタを適用して追跡成分を抽出した。

モデルパラメータの推定には最小二乗法を用いた。視覚制御同定実験のデータから PID パラメータを推定・固定した後、各増幅係数 G のデータに対して予測経路のゲイン K_{coord} ($K_{\text{coord}} \geq 0$) を推定した。

5. 実験結果および考察

5.1 各増幅係数における主体感の変化

各増幅係数における主体感評価の平均値は、表 1 に示す結果となった。増幅係数が 1.0 の条件において最も高い主体感評価が得られ、乖離が大きくなるにつれて低下する傾向が確認された。

Table 1 各増幅係数条件における主体感の平均値および標準偏差

	0.5	0.75	1	1.5	2
平均値	3	4	6	5.4	3.8
標準偏差	1.41	1.22	1.22	1.14	1.30

増幅係数を被験者内要因とした Friedman 検定の結果、増幅係数の主効果は有意 ($\chi^2 = 12.38$, $p = 0.015$) であり、Kendall's W は 0.59 と中程度の効果量を示した。事後検定として行った Wilcoxon 符号付順位検定では個別条件間に有意差は認められなかったものの、 $G = 1.0$ と他条

件との比較において $p = 0.063$ と有意水準に近い値を示し、自己運動と視覚フィードバックの整合性が主体感形成に重要であることが示唆された。

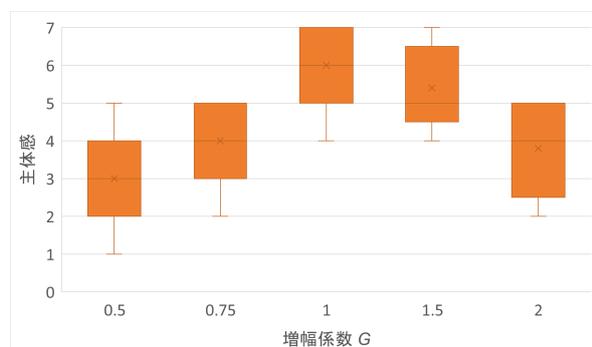


Fig. 6 各増幅係数条件における主体感評価の分布

5.2 パラメータ推定結果とその考察

Fig. 7 に示す通り、推定した各増幅係数における K_{coord} は、一部の例外を除き全体として 0 付近に推定されるケースが多く、明確な条件依存傾向は確認されなかった。

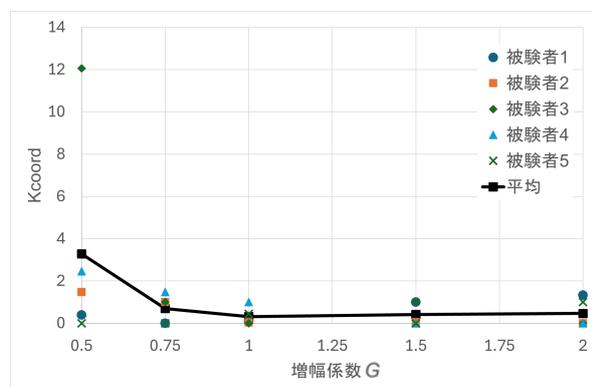


Fig. 7 各増幅係数条件における予測経路パラメータ K_{coord} の推定結果

この結果は、本タスクにおいては視覚情報に基づくフィードバック制御が主要な役割を担っており、遠心性コピーを利用した予測制御の寄与が明確に現れなかった可能性を示唆している。また、本モデルにおいて予測経路を単純な比例ゲインとして記述したため、予測制御の時間的特

性や内部モデル構造を十分に表現しきれなかったことが一因として考えられる。さらに、実際の神経系では視覚フィードバックと予測経路が相互に影響し合うため、条件変化に応じて視覚コントローラ自体も適応的に変化していた可能性が推察される。

6. おわりに

本研究では、VR 環境下における連続的な腕振りタスクと眼球運動計測を用い、追跡眼球運動モデルを通じた主体感の定量的評価を試みた。主観評価の結果から、腕の運動と視覚フィードバックの増幅係数の変化が主体感に有意な影響を与えることが確認された。

一方で、構築したモデルにおける予測経路パラメータ K_{coord} には明確な条件依存性が認められず、予測制御と主体感の関係性を単純なゲインで記述することが困難であることが示された。今後は、予測経路を PID 制御器や確率制御器などのより動的な内部モデルとして拡張し、パラメータの相互作用を考慮した再推定を行うことで、主体感と眼球運動の予測制御機構との関連をより精緻に検証していきたい。

参考文献

- 1) KE Laver, B Lange, S George, JE Deutsch, G Saposnik, M Chapman, and M Crotty. Virtual reality for stroke rehabilitation. Cochrane Database of Systematic Reviews (2025)
- 2) Niclas Braun, Stefan Debener, Nadine Spychala, Edith Bongartz, Peter Sörros, Helge H. O. Müller, and Alexandra Philipsen. The senses of agency and ownership: a review. Frontiers in Psychology, 9 (2018)
- 3) Christopher D. Frith, Sarah-Jayne Blakemore, and Daniel M. Wolpert. Abnormalities in the awareness and control of action. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 355:1771–1788 (2000)
- 4) Patrick Haggard. Sense of agency in the human brain. Nature Reviews Neuroscience, 18:196–207 (2017)

- 5) Shaun Gallger. Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, 4:14–21 (2000)
- 6) Adam Tapal, Ela Oren, Reuven Dar, and Baruch Eitam. The sense of agency scale: a measure of consciously perceived control over one’s mind, body, and the immediate environment. *Frontiers in Psychology*, 8 (2017)
- 7) Patrick Haggard, Sam Clark, and Jeri Kalogeras. Voluntary action and conscious awareness. *Nature Neuroscience*, 5:382–385 (2002)
- 8) Anina Ritterband-Rosenbaum, Anke N. Karabanov, Mark S. Christensen, and Jens Bo Nielsen. 10 hz rtms over right parietal cortex alters sense of agency during self-controlled movements. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8 (2014)
- 9) Pierre Fournier and Marc Jeannerod. Limited conscious monitoring of motor performance in normal subjects. *Neuropsychologia*, 36(11):1133–1140 (1998)
- 10) Henrique G Debarba, Jad-Nicolas Khoury, Sami Perrin, Bruno Herbelin, and Ronan Boulic. Perception of redirected pointing precision in immersive virtual reality. In 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pages 341–346 (2018)
- 11) 稲場直子, 河野憲二. 追跡眼球運動 脳科学辞典. <https://bsd.neuroinf.jp/wiki/追跡眼球運動> (2021)
- 12) D. A. Robinson, J. L. Gordon, and S. E. Gordon. A model of the smooth pursuit eye movement system. *Biological Cybernetics*, 55:43–57 (1986)
- 13) G.R. Barnes. Cognitive processes involved in smooth pursuit eye movements. *Brain and Cognition*, 68(3):309–326 (2008)
- 14) Daniel M Wolpert, R.Chris Miall, and Mitsuo Kawato. Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, 2:338–347 (1998)
- 15) Daniel M. Wolpert, Zoubin Ghahramani, and Michael I. Jordan. An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232):1880–1882 (1995)
- 16) G. M. Gauthier, J. -L. Vercher, F. Mussa Ivaldi, and E. Marchetti. Oculomanual tracking of visual targets: control learning, coordination control and coordination model. *Experimental Brain Research*, 73:127–137 (1988)
- 17) R. C. Miall, D. J. Weir, D. M. Wolpert, and J. F. Stein. Is the cerebellum a smith predictor? *Journal of Motor Behavior*, 25(3):203–216 (1993)
- 18) D. A. Robinson. The mechanics of human saccadic eye movement. *The Journal of physiology*, 174(2):245–264 (1964)