



NEUROFISIOLOGIA DA VISÃO BINOCULAR

AUTOR

Thomas Salmon: Northeastern State University, USA

REVISOR

Scott Steinman: Southern California College of Optometry, USA

O QUIASMA ÓPTICO E O NÚCLEO GENICULADO LATERAL (NGL)

Uma vez que temos dois olhos, cada um com a sua própria imagem, essas duas imagens de alguma forma devem ser fusionadas numa única percepção para visão binocular normal. A fusão motora orienta os olhos para que olhem para o mesmo objecto; as suas imagens serão semelhantes e irão cair em zonas aproximadamente correspondentes nas duas retinas. Os olhos, em seguida, fornecem ao cérebro duas imagens mais ou menos correspondentes que devem ser combinadas numa imagem por fusão sensorial.

A primeira estrutura onde os sinais de pontos da retina correspondentes podem ser conduzidos em proximidade é no **quiasma óptico**. Um objecto no campo visual direito projecta a sua imagem na retina temporal do OS, mas na retina nasal do OD. Deste modo, as fibras neuronais de ambos os olhos esquerdos e direito que têm uma direcção visual semelhante (campo direito) são recolhidos e enviados para o lado esquerdo do cérebro. Da mesma forma, dados do campo visual à esquerda, dos dois olhos, são recolhidos e encaminhados para o lado direito do cérebro. O NGL recebe dados de ambos os olhos para um hemisfério, e apesar dos neurónios que recebem dados de instruções correspondentes das duas retinas estarem em proximidade, os neurónios do NGL são ainda **monoculares**. Ou seja, cada neurónio do NGL recebe uma sinapse do olho direito ou esquerdo, mas não de ambos. Das seis camadas do NGL, as camadas 2, 3 e 5 (de baixo para cima) recebem sinapses do olho ipsilateral (mesmo lado), enquanto as camadas 1, 4, 6 recebem axónios que cruzaram da retina contralateral (lado oposto). (**Steinman Fig. 8-4**) Apesar dos neurónios do NGL serem monoculares, estão organizados para que aqueles com direcções visuais correspondentes sejam alinhados verticalmente (**Steinman Fig. 8-5**). Citando Steinman (p. 242-243),

*O resultado neto é que o cruzamento parcial no quiasma aproximou no NGL os neurónios cujos campos receptivos cobrem pontos correspondentes no campo visual. O quiasma organiza o NGL em termos de pontos da retina correspondentes, para que os neurónios dos **pontos correspondentes**, em cada olho, estejam todos alinhados em camadas do NGL. Esta proximidade organiza as fibras que saem do NGL e que vão para o córtex visual de tal forma que os neurónios que "vêem" o mesmo ponto no espaço visual (a mesma direcção visual), em cada olho, viajam juntos dentro das radiações ópticas.*

Além da organização da cada NGL em camadas ipsilaterais (2, 3, 5) e contralaterais (1, 4, 6), que pode ser dividida em camadas parvocelulares (3-6) e camadas de magnocelulares (1, 2), com base no tamanho dos neurónios (**Steinman Fig. 8-4**). Os neurónios parvo e magno no NGL fazem parte de duas vias paralelas que começam com as células ganglionares da retina e continuam para o córtex visual. Estas duas vias estão envolvidas em funções visuais distintas, conforme resumido na tabela 32.1, abaixo. Embora a maioria dos cientistas acreditem que as primeiras verdadeiras interações binoculares não ocorrerem até o córtex visual, alguns têm especulado que pode haver alguma inibição binocular rudimentar entre sinais neurais recebidos por camadas adjacentes no NGL, conforme ilustrado em (**Steinman Fig. 8-6**).

ESTEREOPSIA ESTÁTICA FINA E DINÂMICA GROSSEIRA

A maioria das funções visuais listadas na Tabela 32.1 diz respeito a Psicofísica da visão e neurofisiologia (aspectos monoculares sensoriais da visão). A linha inferior da Tabela 32.1 adiciona funções binoculares que estão associadas com as suas vias, ou seja, duas subcategorias de estereopsia. Como foi discutido sumariamente na aula 27 (p. 3) os cientistas descobriram que a estereopsia é processada por dois subsistemas fisiológicos, nomeadamente:

- **Estereopsia estática fina** - (associado com o percurso **parvo**)
- **Estereopsia dinâmica grosseira** (associado com o percurso **magno**)

Tabela 32.1 Características dos percursos parvo e magno.

	Sistema Magno	Sistema Parvo
Discriminação de cor	Não	Sim (oposição de cores)
Resposta do neurónio	Transiente	Sustentado
Diâmetro dos axónios das células ganglionares	Maior	Mais pequeno
Transmissão de sinais	Mais rápido	Mais lento
Sensibilidade temporal	Frequência mais alta	Baixa frequência
Sensibilidade espacial	Baixa resolução	Alta resolução
Principal entrada da retina da	Periferia	Fóvea
Linearidade espacial	Alguma não linearidade	Linear
Especialização sensorial	Movimento (onde-sistema de alerta)	Cor/detalhes (o quê-sistema de detalhe)
Visão binocular	Estereopsia dinâmica grosseira	Estereopsia estática fina

Algumas propriedades de estereopsia estática fina (parvo) incluem

- Pequenas disparidades: 2 segundos de arco até 20 minutos de arco (objectos perto do ponto de fixação; ou seja, objectos localizados perto do centro do horóptero)
- 250 msec de latência (mais lento do que para a estereopsia grosseira)
- Principalmente associado com a visão central
- Funciona melhor com alvos estacionários ou movendo-se lentamente
- Funciona melhor com frequências espaciais mais elevadas (> 3 cpg)
- Pode detectar cores diferentes

Algumas propriedades da estereopsia dinâmica grosseira

- Intervalo de disparidade: 40 segundos de arco em graus. Este sistema é estimulado de forma mais forte por objectos localizados ainda mais longe do horóptero.
- Latência de 130 msec de estereopsia grosseira é processado duas vezes tão rápido quanto a estereopsia fina.
- Mais associado com visão periférica.
- Funciona melhor com alvos móveis mais rápidos.
- Mais sensível do que a estereopsia estática em baixas frequências espaciais.
- Insensível à cor

NEUROANATOMIA E FISIOLOGIA DA ESTEREOPSIA ESTÁTICA FINA

A **Fig. 23-22 de Adler Physiology of the Eye** (9ª edição; semelhante à Fig. 29-5 na 10ª edição) mostra as seis camadas do NGL *esquerdo* e a organização em parte do córtex visual primário. A parte superior do cubo está perto da superfície cortical e as camadas inferiores estão mais profundas. **Figura 14-14 de Schwartz** mostra uma perspectiva semelhante do córtex visual primário. Note que ele é organizado nas áreas escuras coloridas (conhecidas como **blobs**) e as regiões mais brancas no meio, **interblobs**.

Os neurónios desta camada projectam-se para camadas II e III mais acima na área V1, e é aqui que os primeiros **neurónios binoculares** se encontram. Os neurónios são binoculares, uma vez que eles recebem dados de ambos os olhos (**Steinman Fig. 8-7**).

Os cientistas encontraram quatro tipos de neurónios binoculares na área V1 do macaco que parecem estar envolvidos em **estereopsia estática-fina**. Respondem mais fortemente a objectos localizados no ou muito próximos do ponto de fixação (pequena disparidade binocular). Respostas para os quatro tipos de células são apresentadas em **Steinman Fig. 8-15** e **Adler Fig. 24-21** (9ª edição).

- "Sintonização próxima" células (TN) respondem mais fortemente a alvos localizados ligeiramente fora mas mais próximo do que o horóptero (900-1800 "ou 15-30 minutos de arco de disparidade cruzada) e são inibidos por alvos localizados mais longe ou mais perto do que isso.
- "Sintonização distante" células (TF) são semelhantes, mas respondem a alvos localizados no lado oposto do horóptero. Eles também são inibidos por alvos localizados noutro lugar.
- "Sintonização zero" (T0) células respondem mais fortemente a destinos localizados muito perto do horóptero, tendo uma disparidade de menos de 180 " (3 minutos de arco). Steinman refere-se a estas *células sintonizadas excitatórias* (p. 257). São inibidas por objectos localizados noutros lugares.
- "Sintonização inibitória" neurónios (TI) não disparam quando os objectos estão perto do ponto de fixação, mas tornam-se activos para objectos que estão a mais de 180° fora do horóptero em ambos os lados.

Cada um destes neurónios parece estar espalhado nas camadas V1 II e III, no macaco, e na IVA também (os seres humanos não têm nenhuma camada de IVA).

NEUROANATOMIA E FISIOLOGIA DA ESTEREOPSIA DINÂMICA GROSSEIRA

O percurso de magnocelular corre a partir das células ganglionares magno na retina, para as duas camadas magno ventral do NGL (1, 2) e ligam-se com os neurónios na camada de IVC α no córtex visual primário (V1). Neste momento os neurónios monoculares são individuais — eles recebem dados quer do olho direito ou esquerdo, dependendo se estão localizados na coluna da dominância ocular direita ou esquerda. Esses neurónios enviam axónios até a camada IVB (ver Schwartz Fig. 14-16, Fig. 23-22 de Adler e Steinman Fig. 8-7; Adlers edição 10, Fig. 29-5 diz IIIB). É aqui que os primeiros neurónios binoculares são encontrados no sistema magno. Os cientistas encontraram dois tipos de neurónios binoculares em V1 no macaco que parecem estar envolvidos no **estereopsia dinâmica grosseira**. Eles são fortemente estimulados por grandes disparidades binoculares e, portanto, pensa-se estarem envolvidos no processamento da estereopsia dinâmica grosseira. As respostas destes dois tipos de células são apresentadas em **Adler Fig. 24-22**.

- Neurónios (NE) de perto respondem fortemente a alvos localizado 450-7200 " (7,5 minutos de arco para 2 graus) mais próximo do que o horóptero (disparidade cruzada), mas são inibidos por alvos localizados no lado oposto do horóptero.
- Neurónios (FA) de longe são o oposto e são ajustados para responder aos objectos 450-7200 " (7,5 minutos de arco para 2 graus) para além do horóptero (disparidade não cruzada). Eles são inibidos por alvos do lado próximo do horóptero.

De acordo com Tychsen (de Adler cap 24), 50% dos neurónios em V1 são sensíveis à disparidade horizontal, e isso inclui aproximadamente o mesmo número de seis tipos de neurónios binoculares (TN, TF, T0, TI, NE e FA). Cerca de 50% dos neurónios V1 não são sensíveis a uma disparidade particular e são chamados, neurónios "flat" (FL).

PARA ALÉM DA
ÁREA V1

A proporção de neurónios sensíveis à disparidade binocular aumenta 50% em V1 para 66% em V2 e 80% em V3. Além disso, as zonas mais elevadas parecem especializar-se numa quantidade cada vez maior de disparidade com maior entrada de visão periférica, conforme ilustrado na Fig. 32.1 (forma modificada de **Adler Fig. 24-26**).

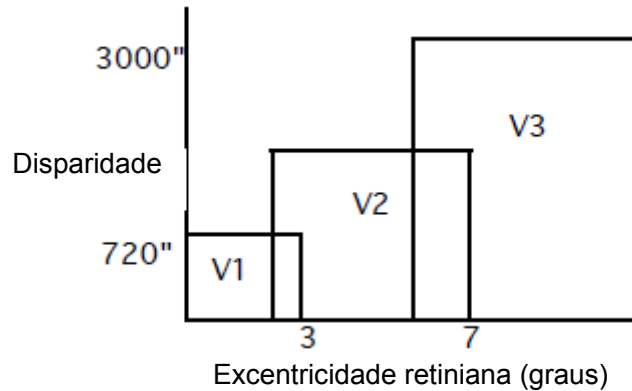


Figura 32.1 Neurónios de alta ordem.

Ambas as trajectórias parvo e magno projetam-se para a área V2, mas para diferentes regiões dentro de V2, conforme ilustrado na Figura 32.2, abaixo e em **Adlers Fig. 23-22**.

O percurso magno estende-se a V3 e a V5 (também chamado MT), o qual contém muitos neurónios que são sensíveis ao movimento, mas não à cor. L+ sugere que esta área oferece suporte à estereopsia grosseira. O córtex MT conecta-se com o nível mais elevado dos neurónios na área mediana superior temporal (MST) e córtex parietal que parecem para processar outras percepções de movimento e profundidade, tal como o **fluxo óptico** e **orientação no espaço** (consulte Steinman p. 262.)

Estas, estão na proximidade de áreas nos lóbulos temporal e parietal que parecem iniciar o movimento ocular, como seguimentos suaves, sacádicos e vergenciais. Do lado parvo, o "bolb" e as áreas de projecções do "interblob" chegam as áreas V4 através da V2. Os neurónios parvo-bolb em V4 parecem apoiar a visão de cor, enquanto os que vêm do caminho parvo-interblob parecem apoiar a visão de forma e estereopsia estática. Eles também podem apoiar a manutenção da fusão motora (vergenzaes). Isso está resumido na Figura 32.2, que foi redesenhado por **Adler Fig. 24-27**.

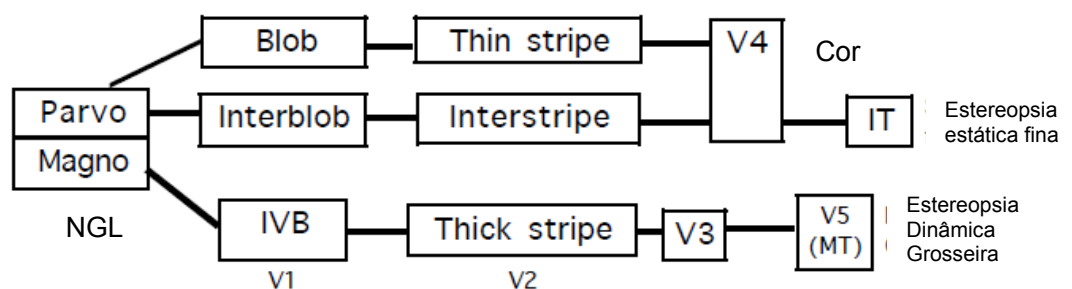


Figura 32.2 Principais vias de suporte de estereopsia dinâmica fina e estereopsia de dinâmica grosseira.

CAMPOS RECEPTIVOS E ESTEREOPSIA

O campo receptivo para um neurónio pode ser medido experimentalmente pela gravação através de um eléctrodo que é colocado perto de um neurónio particular. Durante a gravação da resposta eléctrica da célula, estímulos visuais tais como luzes, são movidos no campo visual de cada olho. Quando a luz está localizada no campo receptivo para o neurónio, será fortemente estimulado.

Os neurónios monoculares no córtex visual são estimulados pelos dados de um olho só. Começando com a segunda sinapse no córtex visual, encontramos os primeiros neurónios binoculares. Estes têm campos receptivos em ambos os olhos, para que sejam capazes de responder às entradas em cada olho. Mas os cientistas descobriram que eles respondem mais vigorosamente quando estimulados por estímulos correctos e apresentados aos campos receptivos de ambos os olhos ao mesmo tempo. Como apresentado na **Fig. 8-8 de Steinman**, o somatório binocular dos sinais neurais só ocorrerem se os estímulos apresentados simultaneamente ao campo receptivo de cada olho tiverem a orientação, a forma e o tamanho correcto.

A **Fig. 14-10 de Schwartz**, mostra que, enquanto os olhos estão fixados num certo ponto, os campos receptivos correspondentes nos dois olhos, que estimulam um neurónio particular, parecem estar localizados em lados opostos ao ponto de fixação. Repare, no entanto, que em algum ponto no espaço, os dois campos receptivos se sobrepõem. Localizando um estímulo luminoso neste ponto no espaço, ele irá estimular ambos os campos receptivos simultaneamente. Desta forma, pode ver que uma quantidade específica de disparidade ideal irá estimular o neurónio binocular; este é um sistema que permite a determinados neurónios a codificação de uma quantidade específica de disparidade e, portanto, uma percepção estereoscópica específica de distância.

A **Figura 8-12 em Steinmann e Fig. 24-26 na 8ª edição de Adler** ilustra como experiências semelhantes realizados com animais em laboratório têm sido realizadas para ver se um neurónio particular é ajustado para um determinado tipo e quantidade de disparidade que corresponde a um objecto localizado num ponto específico do espaço. Os campos receptivos monoculares podem coincidir num ponto à frente, em cima ou por trás do horóptero. Um objecto localizado nesse ponto irá estimular fortemente o neurónio.

BASE NEUROLÓGICA PARA A FUSÃO BINOCULAR

Lembre-se que a estereopsia é o nível mais alto da fusão sensorial. Anterior a este, o sistema visual deve ser capaz de identificar objectos semelhantes (simultâneos ou Worth fusão de grau 1) em imagens dos olhos direitos e esquerdos e combiná-los numa única imagem (Worth de grau 2, fusão plana). A tarefa de encontrar uma correspondência entre características semelhantes nas duas imagens monoculares é chamada **correlação binocular**. Cerca de metade dos neurónios na área V1 parecem estar activos na detecção de formas semelhantes, de contraste e textura. Esses neurónios parecem ser responsáveis em parte, para a **correlação binocular**. Isso pode ser testado usando diagramas de correlação, conforme ilustrado na Fig. 32.3.

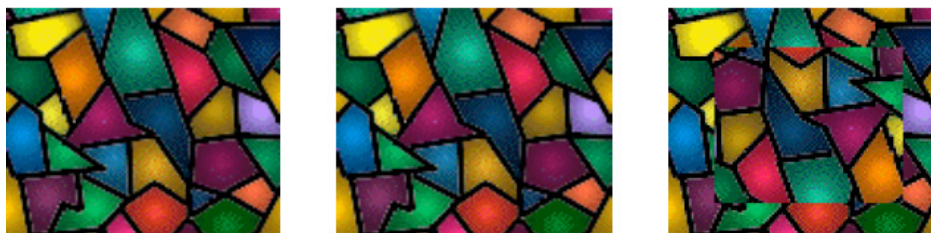


Figura 32.3 Exemplos de imagens correlacionadas (esquerda e central) e imagens que contenham partes não correlacionadas (esquerda e direita).

Os padrões da esquerda e do centro são cópias exatas. Isso representa 100% de correlação binocular. As imagens à esquerda e à direita contêm características que não são correspondentes. Isso representa uma não correlação binocular. Controlando a quantidade de correlação em alvos de teste apresentados aos olhos esquerdo e direito, é possível estudar como os diferentes neurónios respondem a diferentes graus de correlação binocular.

Em situações de visualização natural é possível receber imagens correlacionadas e não correlacionadas nas duas retinas. Obviamente, quando os dois olhos estão a fixar sobre o mesmo objecto, as imagens serão altamente correlacionadas (embora haja disparidades pequenas). Note que a correlação e disparidade são diferentes. Na

disparidade binocular, elementos correspondentes são deslocados uma pequena quantidade lateralmente. Na não correlação, não pode haver nenhum recurso correspondente entre as duas imagens.

Imagens altamente não correlacionadas podem ser apresentadas nos dois olhos quando os estes estão a fixar um ponto no espaço vazio, enquanto imagens diferentes para além do ponto de fixação caem em pontos correspondentes nas duas retinas (**Adler Fig. 24-24**). Isso criará rivalidade e confusão já que diferentes imagens estão em pontos correspondentes.

Os cientistas que estudam visão binocular descobriram que certos neurónios e combinações de neurónios são estimulados por diferentes graus de correlação e isso pode fornecer a base neurológica para os fenómenos binoculares como a supressão. Isso também pode ser demonstrado por potenciais visuais evocados para diagramas de correlação.

O sistema visual é capaz de responder rapidamente às imagens não correlacionadas sem interromper a continuidade da visão. Por exemplo, ao observar algo, se a cabeça de uma pessoa à sua frente bloquear a visão de um olho, a imagem da respetiva cabeça é rapidamente suprimida, e continua a ver a imagem monocular fornecida pelo olho desbloqueado.

NEURÓNIOS CORTICAIS SIMPLES E COMPLEXOS

Estudos com células ganglionares retinianas e neurónios do NGL mostraram que estes neurónios respondem com campos receptivos circulares que têm uma organização centro-periferia (antagonista espacial). Quando os cientistas tentaram estudar primeiro neurónios da área V1 com estímulos circulares semelhantes, os neurónios pareceram não responder.

Na década de 1950 os cientistas Hubel e Wiesel descobriram que a primeira sequência de neurónios no córtex visual respondeu melhor a linhas, barras ou transições em vez de pontos. Referiram-se a estes neurónios como células simples.

Além de ter uma forma alongada, os estímulos também tinham que ter uma orientação específica para estimular uma determinada célula simples (**Schwartz Fig. 14-4**). Como mostrado na **Fig. 14-5 do Schwartz**, campos simples de células recetivas e regiões excitatórias e inibitórias, e alguns respondem melhor a barras, enquanto outros responder melhor a transições.

Uma vez que os campos receptivos do NGL são anulares e fazem sinapse com simples células no córtex visual, os cientistas acreditam que, com efeito, os campos receptivos circulares do NGL somam, como verificado na **Fig. 14-6 de Schwartz** para formar os campos receptivos alongados mais complexos de células simples na área de V1. A complexidade crescente dos campos receptivos com níveis mais altos de processamento neuronal é referida como **processamento em série ou hierárquico**.

Para além das células simples estão as células complexas, cujos campos receptivos requerem que um estímulo se desloque numa determinada direcção. Aparentemente as células complexas recebem dados de células simples, mas os campos receptivos de células simples não se somam de forma linear. Os campos receptivos complexos, portanto, não possuem algumas características presentes nos campos receptivos simples. Eles não são tão sensíveis quanto à posição e não têm regiões discretas excitatórias e inibitórias.

CONSERVAÇÃO MACULAR E O CORPO CALOSO

(Steinman Capítulo 8, p. 245-246; Adlers Capítulo 23, p. 738, Capítulo 24, p. 795-797)

Muitas vezes assumimos que há uma divisão explícita entre as retinas nasais e temporais, tal que todas as (e somente) fibras nasais atravessam o quiasma e as (e somente) fibras temporais não. Nesse caso, objectos no campo visual esquerdo estimulariam as retinas nasal esquerda e temporal direita e, eventualmente, o córtex visual direito. O córtex visual direito receberia informações do campo visual esquerdo de ambos os olhos, e seria possível perceber a disparidade e estereopsia. Contudo, se houvesse uma divisão restrita nasal e temporal, a estereopsia, na linha média, seria impossível uma vez que nem o córtex visual direito nem o esquerdo receberia dados de ambos os olhos.

Sabemos no entanto, que a estereopsia é muito boa para o centro do campo visual — isto é, mais perto ou mais longe do que o ponto de fixação. Como é isso possível? Existem dois mecanismos possíveis.

1. Em vez de ter uma divisão nasal e temporal restrita, parece (pelo menos em macacos) que há um pouco de sobreposição central (aproximadamente $1-2^\circ$). Portanto, algumas fibras temporais cruzam com as nasais e alguns nasais permanecem não-cruzadas com temporais no quiasma. Dessa forma, o córtex visual direito e esquerdo podem receber informações de ambos os olhos para o centro da visão e a estereopsia seria possível.
2. Além disso, parece que algumas fibras do córtex visual direito e esquerdo cruzam para o lado oposto através do corpo caloso.

Steinman descreve um caso clínico interessante em que uma pessoa tinha uma lesão que afectou o quiasma óptico. A pessoa ainda tinha alguma estereopsia para a visão central. Tal só será possível se existisse transferência calosa. Para detalhes, ver Steinman. Adlers também fornece uma discussão interessante sobre este tópico.

SUMAÇÃO BINOCULAR E PVE

Os PVE são usados para medir a resposta do córtex visual primário à visão, e apresenta uma resposta binocular mais forte do que a visão monocular. Testes foram realizados onde se apresentavam alvos ao olho direito, outro alvo para o olho esquerdo, e não foi permitida fusão binocular. A resposta PVE foi gravada. Em seguida, os mesmos estímulos foram apresentados aos olhos, mas desta vez os indivíduos puderam fundir binocularmente. Nesse caso os PVE mostraram uma resposta mais forte. Este apresentou provas electrofisiológicas da somação binocular.

Da mesma forma, têm sido feitos testes com diagramas de correlação de ponto aleatório apresentado ao olho esquerdo e direito. Quando a fusão binocular não é permitida (por exemplo, devido à disparidade vertical), a resposta PVE não é tão forte como quando alvos semelhantes com igual quantidade de correlação são fusionados com estereopsia (por exemplo, quando as disparidades foram horizontais). Isso também é prova que os PVE podem demonstrar soma binocular. Leia também o teste de PVE "beat" na p. 250-251 de Steinman.

BIBLIOGRAFIA

- Steinman et al. **Foundations of Binocular Vision**. McGraw-Hill, New York, 2000. Chapter 8.
- Kaufmann PL. **Adler's Physiology of the Eye, 9th Ed**. Mosby Yearbook, St. Louis. 1992. Chapter 23 and 24
- Benjamin W. Borish's **Clinical Refraction**. WB Saunders, Philadelphia. 2006.
- Schwartz S. **Visual Perception - 2nd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, CT, 1999. Chapter 14.
- Cline D, Hofstetter HW and Griffin JR. **Dictionary of visual science. 4th Edition**. Butterworth-Heinemann, Michigan. 1997.
- Kaufmann PL, Alm A and Francis HA. **Adler's Physiology of the Eye, 10th Ed**. Mosby, St. Louis, 2003.
- Schor CM and Ciuffreda KJ. **Vergence eye movements: Basic and clinical aspects**. Butterworth, Michigan. 1983.
- Von Noorden GK. **Binocular Vision and Ocular Motility - 5th Edition**. Mosby, St. Louis. 1996.
- Ciuffreda KJ and Tannen B. **Eye Movement Basics for the Clinician**. Mosby, St. Louis, 1995.
- Griffin JF. **Binocular Anomalies - Diagnosis and Vision Therapy, 3rd Edition**, Butterworth-Heinemann, 1995.
- Kandel. **Essentials of Neural Science and Behavior**, Appleton & Lange, 1995.
- Reading RW. **Binocular Vision**. Butterworth Publishers, Woburn, MA, 1983.