



DERLEME

UZAYDA DENGE

Dr. Yusuf Burak KAPUCU², Dr. Atila GÜNGÖR¹

¹Gülhane Askeri Tıp Akademisi Haydarpaşa Eğitim Hastanesi, KBB, İstanbul, Türkiye ²Tatvan Asker Hastanesi, KBB, Bitlis, Türkiye

ÖZET

Sıfır yerçekimi ortamında her organ sistemi gibi vestibuler sistem de etkilenmektedir. Yukarı ve aşağı gibi yön tabirleri yerçekiminin varlığında kullanılabilir. Yeryüzünde çalışmaya adapte olan vestibuler sistem üzerinde, sistemin işleyişinin temelini oluşturan yerçekimi kuvvetindeki değişikliklerin etkisi büyük olmaktadır. Yerçekiminin ve dengenin ortadan kalkması sonucu uzay hareket hastalığı (UHH) ortaya çıkmakta, adaptasyon mekanizmalarının devreye girmesi ile denge yeniden sağlanmaktadır. Bu makalede uzayın vestibuler sistem, denge ve adaptasyon üzerine etkilerini konu alan çalışmalara genel bir bakış sunuldu.

Anahtar Sözcükler: Uzay, denge, vestibuler sistem

BALANCE IN SPACE

SUMMARY

Vestibular system is also affected in zero-gravity like all other organ systems. Direction interpretations such as up and down can be use under the influence of gravity. Impact of the changes in gravitational force are great that constituting the basement in the functioning of the vestibular system which has been adapted to work on earth. Space motion sickness (SMS) is caused by the disappearance of the gravity and balance. Balance is provided again with the introduction of mechanisms of adaptation. In this article, we presented an overview of the studies about the effects of space on the vestibular system, balance and adaptation issues.

Keywords: Space, balance, vestibular system

İnsanoğlu var olduğundan beri gökyüzüne bakarak “orada ne var?” sorusuna cevap aramıştır. Bilimin ve teknolojinin son yüzyılda kaydettiği gelişmeler bu ve benzeri birçok soruya cevap vermiş, fakat bizleri cevaplamamız gereken yeni soru ve sorunlarla karşı karşıya bırakmıştır¹.

Son 50 yıldır devam eden insanlı uzay araştırmaları yerçekimsiz ortamda her organ sisteminin etkilendiğini göstermiştir. Dünyada hareket halinde yönü ve hızı belirlememize yardımcı olan, dengeyi kurmamızı sağlayan vestibuler sistem de yerçekimsiz ortamda bu görevini yerine getirme sırasında adaptasyon sorunları yaşamaktadır²⁻⁸. Uzay yolculuklarının vestibuler sistemdeki etkileri ve adaptasyon dönemi uçuş sürecini olumsuz etkiler. Bu nedenle uzayda vestibuler sistemin işleyişi ve adaptasyonu üzerine yapılacak çalışmalar daha uzun ve konforlu seyahatleri mümkün kılacaktır¹.

Yerçekiminin vestibuler sistemdeki etkisini anlamamız, uzayda bu işleyişin aksaklıklarını ortaya koymaya ve karşılaşılan sorunları açıklamamıza yardımcı olacaktır. Bu makalede uzayın vestibuler sistem üzerine etkilerini konu alan çalışmalar incelenerek yerçekimsiz ortamda denge ve adaptasyon konuları gözden geçirilmiştir.

Fiziki mekânın yapısı direkt algılama ve zihinsel temsil sistemleri ile algılanır. Zihinsel temsil sistemi; görsel, somatosensoriyel, propriyoseptif ve vestibuler sistem tarafından çevreden toplanan bilgilerin birleştirilmesi ile oluşur. Bu sistem postural dengenin devamlılığı, hareketin hissedilmesi ve vücudun herhangi bir parçasının lokalizasyonunun farkındalığını sağlar⁹. Vestibuler sinirin bir parçası yarım daire kanallarının endolenf ile dolu ampulla bölgesinde saçlı hücreler ile sinaps yaparak başlar. Saçlı hücrelerin özelleşmiş duyuşal çıkıntıları olan sterosilyalar ve kinosilyum jelatinöz materyal içerisinde gömülü şekilde yerleşir. Bu uzantıların yerçekimi ve hareketle oluşan salınımları ile hareketin yönü, hızı ve ivmesi algılanarak hareket hakkındaki temel bilgiler elde edilir¹⁰. Vestibuler sinirin diğer parçası ise “otolit organlar” olarak da bilinen utrikul ve sakkulün makulasındaki saçlı

İletişim kurulacak yazar: Dr. Yusuf Burak Kapucu, Tatvan Asker Hastanesi, KBB, Bitlis, Türkiye, E-mail: burakkapucu@yahoo.com

Gönderilme tarihi: 04 Haziran 2012, revizyonun gönderildiği tarih: 02 Ekim 2012, yayın için kabul edilme tarihi: 02 Ekim 2012



hücreler ile sinaps yaparak başlar. Bu saçlı hücrelerin duyuşal uzantıları olan sterosilyalar ve kinosilyum kalsiyum karbonat kristalleri içeren otolitik membran içerisinde gömüldür. Doğrusal (vertikal veya horizontal) hızlanma ile hareketlenen endolenf hareketi ile oluşan siliyer defleksiyon sonucunda başın pozisyonu, doğrusal hızlanmanın yönü ve hızı algılanır.

Sakkul vertikal, utrikul horizontal hızlanmaya daha duyarlıdır. Yarım daire kanalları ise her 3 düzlemdeki açısal hızlanmanın yönünü ve hızını algılamamızı sağlar¹⁰⁻¹². Doğrusal hızlanma, yönde herhangi bir değişiklik olmadan düzlemsel olarak hızın artıp-azalmasıdır. Açısal hızlanma ise aynı zamanda hem hızın artışı ve hem de yönün değişmesidir. Açısal hızlanma sırasında vestibulo-oküler refleks üzerine yapılan çalışmalarda yerçekimi (gravity, g) kuvvetinin normal ya da düşük olması arasında herhangi bir fark olmadığı gösterilmiştir^{13,14}. Uzay yolculuğu sırasında oluşan vestibuler etkilerin otolit aracılı doğrusal hızlanma ve vestibulo-oküler refleks ile ilgili olduğu birçok çalışmada saptanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda yerçekimsiz ortamda asıl etkilenen vestibuler organın otolit organlar olduğu anlaşılmıştır^{2,11-14}.

Uzay programlarının başlamasıyla birlikte yerçekimsiz ortamın vestibuler fonksiyonlar üzerindeki etkileri önemsenmeye başlanmış ve 1965 yılında *National Aeronautics and Space Administration*¹⁵ "Vestibuler Organların Uzay Araştırmalarındaki Rolü" konulu ilk sempozyumu düzenlemiştir. Vestibuler sistemin olağan çalışmasındaki ilk koşul hareket esnasında sabit bakışın sağlanmasıdır. Yeryüzünde 1 g ortamda çalışmak üzere dizayn edilmiş bu sistem, uzayda genellikle hatalı ve karmaşık bilgiler üretebilir ve sonuçta denge problemleri yani uzay hareket hastalığı (UHH) ortaya çıkabilir.

UHH astronotların (veya kozmonotların) ilk uçuşlarının en az %70'inde görülür ve sonraki uçuşlarda görülme sıklığı azalır¹⁶. Sendromun bulguları yerçekiminin azalmasından sonraki ilk 1-2 saat içerisinde başlar. Hareket hassasiyeti, genellikle bulantı olmadan kusma, halsizlik, kırgınlık, sinirlilik, uyku hali ve baş ağrısı gözlenir. Karada oluşan hareket hastalığında solukluk ve terleme sık karşılaşılan semptomlar olmasına rağmen UHH'de pek olmaz¹⁷⁻¹⁹.

Dünyaya döndükten sonra yerçekimine adaptasyon sürecinde de sıklıkla vestibuler semptomlara rastlanır. Astronotların (veya kozmonotların) %69'unda motor hareketlerde beceriksizlik, %66'sında düz çizgide yürümekte zorluk, %60'ında uçuşun devam ettiği hissi,

%32'sinde yürüme esnasında vertigo, %29'unda ayakta dururken vertigo, %15'inde bulantı, %10'unda konsantrasyonda zorluk ve %8'inde kusma gözlenir³. Semptomlar birkaç hafta içinde kendini sınırlar, fakat bu süre içerisinde tekrarlamalar görülebilir. Semptomların şiddeti ve görülme sıklığı uzayda geçirilen süreye, yerçekimsiz ortama bireysel adaptasyon becerisine ve rehabilitasyona bağlıdır¹⁷. UHH'nin tedavisinde kullanılan ilaç H₁ reseptör blokleri olan prometazindir ve bulantı ortaya çıkınca kullanılır. Ancak yan etki olarak ortaya çıkan belirgin sedasyon rutin kullanımını kısıtlar. Sedasyon etkisi düşük antihistaminik, antikolinergik ve benzodiyazepin grubundan ilaçlar da UHH tedavisinde kullanılırlar. UHH en fazla iniş ve kalkış sırasında görülür ve dikkatin de en üst seviyede olması gereken anlar da bunlardır. Dolayısı ile bu ilaçların kalkış ve iniş sırasında kullanımı ikilem oluşturur. Bu nedenle nörovestibuler rehabilitasyona yönelik araştırmalar devam etmekte, uçuş öncesi çalışmalar ve uçuş sırasında alınacak önlemler halen test edilmektedir^{2,18-22}.

Uzay yolculuğu sırasında hücre düzeyinde bazı değişiklikler olduğu gözlenmiştir. Kalkış esnasındaki titreşimin ve oluşan yaklaşık 3 g kuvvetin hücre iskelet yapısında dejenerasyon oluşturduğu saptanmıştır²³. Farelerde yapılan çalışmalarda uzay yolculukları sonrasında otokoniyaların²⁴ ve saçlı hücrelerin sinaps sayılarında artma tespit edilmiş²⁵, sinaps sayılarındaki bu artışın uçuşun 13. günü iki katına çıktığı ve dünyaya döndükten sonraki 8. günde azalmaya başladığı gösterilmiş²⁶, santral sinir sisteminde otolitlerden aferent lifler alan serebellar Purkinje hücrelerinde sıkışmış lameller cisimler, mitokondrilerin boyutunda artış ve sinaptik reorganizasyonlar saptanmıştır²⁷.

Semptomlar santral ve periferik duyu sistemlerinin entegrasyonunun bozulması nedeniyle oluşmaktadır. Bu durumu açıklamak için vestibuler, somatosensöriyel ve visseral sensörlerden kaynaklanan sinyallerin birbirleri ile veya kayıtlı hafızaları ile olan tutarsızlığı temeline dayanan "nöral veya sensöriyel uyumsuzluk teorisi" ilgi çekmiştir. Bu teoriye göre 1 g'de otolit organlar yerçekimi ve eylemsizliğe sinyal değişiklikleri ile yanıt vererek başın pozisyonunu yerçekimine görece olarak belirlerler. Yerçekiminin azalması ile birlikte otolitler artık ağırlıksızdır, başın pozisyonu hakkında bilgi oluşturamazlar. Sonuçta vestibulo-oküler refleksin alışlagelmiş 1 g ortamdan çıkarak yerçekimsiz koşullarda göstereceği tepki farklı olacaktır. Bu da UHH semptomlarının gözlenmesine yol açacaktır²⁸.



Vestibulo-spinal refleks yerçekimine karşı ekstansör tonusun korunmasında ve dik duruşun idamesinde etkilidir. İnsanlı uzay seyahatlerinde uzun süre kalıcı postür kontrol yetersizliğine rastlanılmamış olmasına rağmen uzun uzay uçuşlarının farelerde kalıcı postür sorunları yarattığı gösterilmiştir^{4,29}. Ancak uzun süre yerçekimsiz ortamda kalmanın insanlar üzerindeki kalıcı postür değişikliği etkisinin açıklanması için ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

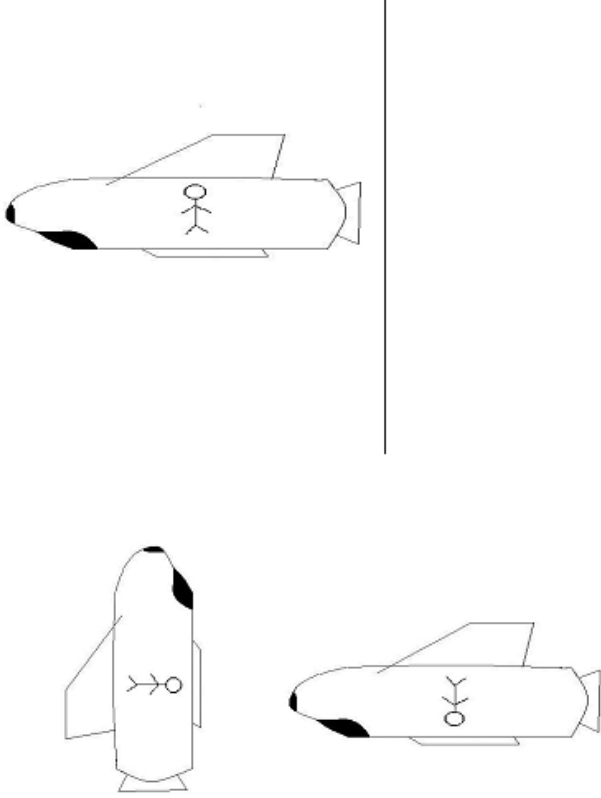
UHH'ye adaptasyon sürecini açıklamak için de çeşitli teoriler öne sürülmüştür. “Sensoryel yeniden yorumlanma hipotezi” yerçekimsiz ortama fizyolojik adaptasyon için otolit organların ürettiği aferent sinyallerin yeniden düzenlendiğini varsayar. Otolit organlar 1 g çekim kuvvetinde yerçekimi ve doğrusal kuvvetin etkisi altında sinyal üretirler. Doğrusal kuvvetin şiddeti ve yönü g kuvveti varken anlamlıdır. Uzay boşluğunda (yerçekimsiz ortamda) otolit organlar sadece doğrusal hızlanmaların etkisinde kalır ve sabit bir doğrusal referans oluşmaz. Otolit sinyallerin bu belirsizliğinin yeniden yorumlanması, santral sinir sisteminin yarım daire kanallarından, diğer oryantasyon duyarlarından gelen bilgiler ile hareketin yorumlama tecrübelerinin entegrasyonu ile sağlanır. Santral sinir sistemi bu işlemi ya otolit organlardan gelen bilgileri baskılayarak veya seçici olarak kodlayarak yapabilir ve sonuçta otolit organların göz hareketleri, postür ve uzaysal oryantasyona olan etkilerini azaltır^{30,31}.

Spacelab-1, Spacelab D-1 ve STS 41-D yörüngede yapılan uzay araştırma görevleridir. Görevler sırasında uzay oryantasyonu ve denge konularında insanın uyarılma ve tepkilerini araştırmak için deneyler yapılmıştır. Testlerde vestibulo-spinal refleks yanıtlarının erken uçuş döneminde ve uçuş süresince baskılandığı, inişten birkaç saat sonra ise uçuş öncesi seviyeye döndüğü izlenmiştir. Testler sonrası ağırlıksız ortama adaptasyonu sağlamada yerçekimi reseptörlerinin etkisinin azaldığı, adaptasyonu sağlamak için görsel ve dokunsal verilerden yararlanmanın arttığı saptanmıştır. Uçuş sonrası testlerde sabit görme alanının kullanımında bir miktar artmanın olduğu, uçuş esnasında propriyosepsiyonun bozulduğu gözlenmiştir. Uçuş sonrası yapılan yatay doğrusal hızlanma testlerinde zıt yöne rotatuvar nistagmus refleksinde azalma, hafif seviyedeki hızlanmaları anlama kabiliyetlerinde değişik seviyelerde artma

saptanmıştır. Eşik üstü hızlanmaları anlama kabiliyetinin arttığı, postrotatuvar nistagmusun bir miktar gecikmeye uğradığı gösterilmiştir. Yeryüzünde otolit organlar ve yerçekimi etkisi ile oluşan dönme hareketi bittiği anda başı öne eğme sırasında (dumping) oluşan nistagmusun yerçekimsiz ortamda olmaması beklenir, ancak uçuş öncesi testlere göre bu nistagmusun daha kısa sürdüğü tespit edilmiştir. Uçuş esnasında gözler kapalıyken sabit bir noktayı gösterme yetisi yani “zihinsel haritalama duyusu” (Gözler kapalı iken kişinin döndürülmesi ve ardından nesnelerin nerede olduğu sorularının cevaplanarak nesnelere uzaydaki yerlerine yerleştirme duyusu) uçuş öncesi testlere göre oldukça düşük seviyede bulunmuştur. Zira gözler kapalıyken sabit olan dış dünyanın zihinsel haritası sabit yerçekimine bağlıdır. Ayrıca uçuştan sonra yapılan elektrofizyolojik testlerde de postüral dengenin bozulduğu gözlenmiştir^{5,6,8,32-34}.

Yerçekimi dünyadaki uzaysal oryantasyonun sağlanmasında ana rolü üstlenir. Yukarı olarak ifade edilen yön, yerçekimine karşı güçlerin vücut üzerine oluşturduğu etkiler ile anlaşılır. Uzayda yön tabirleri kullanılamaz. Her şey boşlukta serbest asılıdır. Geleneksel olarak algılanan yukarı yönü yerçekimine göre belirlenir. Bu yukarı yön “subjektif görsel vertikal (SGV)” olarak adlandırılır³⁵. Bu yönü belirlemede esasen yerçekimi etkili olsa da çevreden toplanan görsel bilgiler ve vücudun pozisyonu da etkilidir. Vücudun yönünü değiştirerek, yerçekiminde rölatif değişiklik yaratarak ve çevresel verileri değiştirerek SGV'in yönünde sapmalar yapılabildiği ve bu sapmaların bireyler arasında farklılık gösterdiği saptanmıştır. Yeryüzünde görsel zenginliğin fazla olduğu ortamlarda SGV'de meydana gelen değişiklikler daha belirgin hale gelmektedir³⁶. Dyde ve ark.³⁷ 1 g'de SGV'yi belirlemede görsel verilerin ve görsel hafızanın yaklaşık % 25 rolü olduğunu, oysa vücut pozisyonu ve yerçekiminin rolünün yaklaşık % 75 olduğunu göstermişlerdir.

Mekiğin içerisinde birbirine ters asılı duran iki astronot vücut pozisyonlarına göre yukarı yönü olarak baş istikametlerini göstereceklerdir (Şekil 1). Görsel hafıza ve görsel veriler ise mekiğin tavanını yukarı yön olarak belirlemede yardımcı olacaktır. Fakat “mekiğin yukarı yönü neresidir?” “Mekik neye göre yukarı veya aşağıdadır”, hatta “dünya neye göre yukarıdadır” ve dahası “yukarısı neresidir?”



Şekil 1: Uzay boşluğunda serbest asılı duran mekiklerin içerisindeki astronotların yukarı yönü belirlemesindeki zorluk gösterilmek istenmiştir. Uzaydaki bu mekiklerin içerisindeki astronotlar kendi yukarı yönlerini göstermekte birbirlerinden farklılık göstereceklerdir (Şekiller yazar tarafından çizilmiştir).

Astronotların gün içerisindeki oryantasyon deneyimlerini sorgulayan birçok anket verileri toplanarak deneklerin genel olarak iki kategoriye ayrıldığı görülmüştür. Bir grup astronot uzay aracının görsel verilerine göre vücut oryantasyonlarını belirlerken diğer grup astronotun ayaklarının altını aşağı yön olarak düşünerek vücut oryantasyonlarını belirlediği gözlenmiştir^{38,39}. Yerçekimsiz yörünge uçuşlarında yapılan deneylerde ise denekler gözleri kapalı şekilde pasif olarak döndürülmüş ve gözleri kapalı olarak mekiğin tavanını göstermeleri istenmiştir. Denekler ısrarcı şekilde tavan (yukarısını) yönü olarak baş istikametini göstermişlerdir (Şekil 1).

Bu sonuçlar yerçekimsiz ortamda kendi "yukarı" yönünü belirlemede vücut vektörünün baskın belirleyici olduğunu gösterir. Yukarı yönünü belirlemedeki ısrarcı baş istikametini gösterme durumu uçuşun 30. gününde azalma eğilimi gösterir ve bu durum adaptasyon mekanizmalarının devreye girmesi ile açıklanır⁷. Görsel verilerin yukarı yönünü belirlemesi üzerine yapılan çalışmalarda beklenilenin

aksine yerçekimsiz ortamda görsel verilerin dünyaya oranla daha az etkili olduğu gösterilmiştir. Bu durum dengesizlik sonucu oluşan nistagmusun görsel karmaşıklığa yol açtığı ve görsel veri belirleyiciliğini azaltması ile açıklanmıştır^{37,40}.

Görsel karmaşıklığa adaptasyon sonucu görsel verilerin yön belirleme üzerine etkisi artma gösterebilir. Parabolik uçuş deneylerinde (Dünyada yerçekimsiz ortam yani sıfır g yaratmak için kullanılan bu yöntemde özel olarak tasarlanmış bir uçak belirli bir yüksekliğe tırandıktan sonra bir parabol izleyerek serbest düşüşe geçer ve düşüş esnasında yolcular belirli bir süre ağırlıksız hale gelirler) gözleri kapalı şekilde serbest asılı olan deneklerin zihinsel haritalama duyularını kaybettikleri de gösterilmiştir⁸.

Yeryüzünde 1 g ortamda çalışmaya adapte olmuş ve çok hassas bir dengede işleyen vestibuler sistemin çalışmasında temel olan yerçekimi kuvvetindeki değişikliğin denge üzerinde büyük etkisi vardır. Yerçekimindeki değişikliğin vestibuler sisteme etkisi ve adaptasyon üzerine yapılan araştırmalar bu etkileşimi açıklamaya çalışmaktadır. Karşılaşılan sorunlarla mücadele ve bu etkileri azaltma konusunda yapılacak ileri çalışmalara ihtiyaç olduğu aşikârdır.

Sonuç olarak uzayda asıl gerçek yukarının veya aşağıının olmadığıdır. Yerçekimsiz ortamda yön belirlemede vücut vektörü ve görsel algılar temel belirleyici olsalar da bu duyulardan elde edilen sonuçlar bireyler arasında değişiklikler göstermektedir. Uçuş öncesi eğitim ve tecrübe ile bu girdilerin birleştirilmesi karmaşıklığı azaltıp adaptasyon sürecini kısaltacak ve görevin etkinliğini artıracaktır.

KAYNAKLAR

1. Robert K, David S. Space exploration, Mars, and the nervous system. Arch Neurol 2007; 64:485-490.
2. Cohen B, Yakushin SB, Holstein GR, et al. Vestibular experiments in space. Adv Space Biol Med 2005; 10:105-164.
3. Bacal K, Billica R, Bishop S. Neurovestibular symptoms following space flight. J Vestib Re 2003; 3:93-102.
4. Ross MD, Tomko DL. Effect of gravity on vestibular neural development. Brain Res Rev 1998; 28:44-51.
5. Young LR, Oman CM, Watt DGD, et al. Spatial orientation in weightlessness and readaptation to Earth's gravity. Science 1984; 225:205-208.
6. Young LR, Shelhamer M. Microgravity enhances the relative contribution of visually- induced self motion sensation. Aviat Space Environ Med 1990; 61:525-530.
7. Glasauer S, Mittelstaedt H. Perception of spatial orientation in microgravity. Brain Res Rev 1998; 28:185-193.



8. Lackner JR, Graybiel A. Parabolic flight: Loss of sense of orientation. *Science* 1979; 206: 1105–8.
9. Gibson JJ. *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin, 1966.
10. Timothy CH, Janet OH. Anatomy and physiology of the normal vestibular system. In Steven LW, ed. *Vestibular rehabilitation*. 3rd ed. Philadelphia; 2007: 2-18.
11. Wilson VJ, Melvill Jones GM. *Mammalian vestibular physiology*. New York: Plenum, 1979.
12. Young LR. Perception of the body in space: Mechanisms. In Brookhart JM, Mountcastle VB ed. *Handbook of physiology, the nervous system*, Vol III, 1984: 1023–1066.
13. Benson AJ, Vieville T. European vestibular experiments on the Spacelab-1 mission: 6. Yaw axis vestibuloocular reflex. *Exp Brain Res* 1986; 64:279-283.
14. Oman CM, Balkwill MD. Horizontal angular VOR, nystagmus dumping and sensation duration in Spacelab SLS-1 crewmembers. *J Vestib Res* 1993; 3:315-330.
15. Graybiel A (ed.), *The Role of the Vestibular Organs in Space Exploration*. NASA, Washington, DC: NASA SP-77 1965.
16. Davis JR, Vanderploeg JM, Santy PA, Jennings RT, Stewart DF. Space motion sickness during 24 flights of the space shuttle. *Aviat Space Environ Med* 1988; 59(12):1185–1189.
17. Bloomberg JJ, Mulavara AP: Changes in walking strategies after spaceflight. *IEEE Eng Med Biol Mag* 2003; 22:58–62.
18. Jennings RT. Managing space motion sickness. *J Vestib Res* 1997; 8:67–70.
19. Thornton WE, Moore TP, Pool SL, Vanderploeg JM. Clinical characterization and etiology of space motion sickness. *Aviat Space Environ Med* 1987; 58(9 Suppl): A1–8.
20. Lackner JR, Dizio P. Space motion sickness. *Exp Brain Res* 2006; 175:377–399.
21. Pingree BJW. Space motion sickness. *J R Nav Med Serv* 1990; 76:25–32.
22. Kozlovskaya IB. Countermeasures for long-term space flights, lessons learned from the Russian space program. *J Gravit Physiol* 2002; 9:313–317.
23. Lewis ML, Cubano LA, Zhao B, et al. cDNA microarray reveals altered cytoskeletal gene expression in space flown leukemic T lymphocytes (Jurkat). *FASEB J* 2001; 15:1783-1785.
24. Ross MD, Donovan K, Chee O. Otoconial morphology in space-flown rats. *Physiologist* 1985; 28:219-220.
25. Ross MD. A spaceflight study of synaptic plasticity in adult rat vestibular maculas. *Acta Otolaryngol Suppl* 1994; 516:1-14.
26. Ross MD. Changes in ribbon synapses and rough endoplasmic reticulum of rat utricular macular hair cells in weightlessness. *Acta Otolaryngol* 2000; 120:490-499.
27. Holstein GR, Kukielka E, Martinelli GP. Anatomical observations of the rat cerebellar nodulus after 24 hr of space flight. *J Gravit Physiol* 1999; 6:47-50.
28. *A Strategy for research in space biology and medicine into the next century*. Washington, DC: National Academy Press, 1998.
29. Walton KD, Harding S, Ansel D, Harris YT, Linas R. The effects of microgravity on the development of surface righting in rats. *J Physiol* 2005; 565:593-608.
30. Young LR, Shelhamer M, Modestino SA. Canadian vestibular experiments on the Spacelab-1 mission: 2. Visual vestibular tilt interactions in weightlessness. *Exp Brain Res* 1986; 4:299-307.
31. Oman CM. Space motion sickness and vestibular experiments in spacelab, SAE-AIAA. Intersociety Conf on Environmental Systems, Long Beach: CA, 1982.
32. Young LR, Oman CM, Watt DGD, et al. MIT\Canadian vestibular experiments on the Spacelab-1 mission; 1: sensory adaptation to weightlessness and readaptation to one-g: an overview. *Exp Brain Res* 1986; 64:291-298.
33. Arrott AP, Young LR, Merfeld DM. Perception of linear acceleration in weightlessness. *Physiologist* 1991; 34:40-43.
34. Watt DG, Monkey KE, Bondar RL, Thirsk RB, Garneau M, Scully-Power P. Canadian medical experiments on shuttle flight 41-G. *Can Aeronaut Space J* 1985; 31:215-226.
35. Mittelstaedt H. The subjective vertical as a function of visual and extra retinal cues. *Acta Psychol* 1986; 63:63–85.
36. Asch SE, Witkin HA. Studies in space perception. II. Perception of the upright with displaced visual fields and with body tilted. *J Exp Psychol Gen* 1992; 121(4):407-418.
37. Dyde RT, Jenkin MR, Harris LR. The subjective visual vertical and the perceptual upright. *Exp Brain Res* 2006; 173:612–622.
38. Oman CM, Kulbaski M. Spaceflight affects the 1-g postrotatory vestibulo–ocular reflex. *Adv Otorhinolaryngol* 1988; 42:5–8.
39. Oman CM, Lichtenberg BK, Money KE. Space motion sickness monitoring experiment: Spacelab 1. In: Crampton GH, ed, *Motion and space sickness*. Boca Raton: CRC Press, 1990:217–246.
40. Cheung BS, Money KE, Howard IP. Human gaze instability during brief exposure to reduced gravity. *J Vestib Res* 1994; 4:17–27.