

Ketinggian Pengaktifan Korteks dan Kebergantungan Hemodinamiknyanya semasa Tepikan Jari Rentak Sendiri Bilateral Pelbagai Gaya (Cortical Height Extent of Activation and its Hemodynamic Dependencies during Bilateral Self-paced Finger Tapping of Multiple Styles)

A.N. YUSOFF

ABSTRAK

Kajian pengimejan resonans magnet kefungsiannya (fMRI) subjek tunggal ini mengkaji hubungan kait asas antara parameter hemodinamik dengan ketinggian pengaktifan (nilai t) bagi beberapa korteks berkaitan motor. Dalam kajian ini, subjek melakukan empat gaya tepikan jari rentak sendiri iaitu sentuh-perlahan (SP), sentuh-laju (SL), tekan-perlahan (TP) dan tekan-laju (TL) dalam satu imbasan fMRI. Data fMRI dianalisis menggunakan pemetaan statistik berparameter (SPM). Keputusan analisis mendapati otak mengkoordinasi keempat-empat gaya tepikan dengan penglibatan girus presentral (PCG) bilateral, kawasan motor tambahan (SMA), lobus parietal superior (SPL) dan serebelum. SPL didapati menunjukkan anjakan kelateralan akibat peningkatan laju tepikan. Magnitud pengaktifan pada SPL kiri yang lebih rendah berlaku semasa tepikan perlahan manakala tepikan laju memperlihatkan magnitud pengaktifan yang lebih tinggi pada SPL kanan. Plot nilai t melawan peratus perubahan isyarat bagi kesemua kawasan tersebut untuk kesemua gaya tepikan menunjukkan korelasi positif ($p < 0.05$, $\rho = 0.67$). Nilai t menunjukkan korelasi positif tak bererti terhadap efikasi neuron ($p = 0.08$, $\rho = 0.40$), korelasi positif bererti terhadap pereputan isyarat ($p < 0.05$, $\rho = 0.85$) dan masa transit ($p < 0.05$, $\rho = 0.88$) serta korelasi negatif bererti terhadap suap balik ($p < 0.05$, $\rho = 0.89$). Pemalar kekerasan (α) dan peratus ekstraksi oksigen (E_o) didapati kekal malar untuk kesemua korteks dalam semua cara tepikan. Kajian ini telah mendedahkan maklumat asas berguna mengenai ciri hemodinamik beberapa korteks berkaitan motor yang mengalami pengaktifan.

Kata kunci: Efikasi neuron; masa transit; peratus perubahan isyarat; pereputan isyarat; suap balik

ABSTRACT

This single participant functional magnetic resonance imaging (fMRI) study investigates the fundamental relationship between several hemodynamic parameters and the height extent of activation (t-value) for several motor-related cortices. In this study the participant performed four styles of self-paced hand finger tapping which are soft-slow (SS), soft-fast (SF), hard-slow (HS) and hard-fast (HF) in an fMRI scan. The fMRI data were analysed using statistical parametric mapping (SPM). The analytical results indicated that the brain coordinates all four tapping styles with the involvement of bilateral precentral gyrus (PCG), supplementary motor area (SMA), bilateral superior parietal lobules (SPL) and cerebellum. SPL was found to exhibit laterality shift due to the increase in tapping speed. A lower activation magnitude in the left SPL occurs during slow tapping while fast tapping exhibits higher activation magnitude in the right SPL. The t-values versus percentage of signal change (PSC) plot for all regions and for all tapping styles exhibits positive correlation ($p < 0.05$, $\rho = 0.67$). The t value shows insignificant positive correlation with neuronal efficacy ($p = 0.08$, $\rho = 0.40$), significant positive correlation with signal decay ($p < 0.05$, $\rho = 0.85$) and transit time ($p < 0.05$, $\rho = 0.88$) and significant negative correlation with feedback ($p < 0.05$, $\rho = 0.89$). The stiffness coefficient (α) and the percentage of oxygen extraction (E_o) remain constant for all cortices in all tapping styles. This study has revealed useful fundamental informations on the hemodynamic characteristics of several activated motor related cortices.

Keywords: Feedback; neuronal efficacy, percent signal change, signal decay, transit time

PENDAHULUAN

Korteks berkaitan motor adalah kawasan spesifik di dalam otak yang bertanggungjawab mengawal dan menyelaras pergerakan anggota atas dan bawah. Kawasan otak yang diklasifikasikan sebagai korteks berkaitan motor adalah korteks somatoderia primer (Kawasan Brodmann (BA) 1, 2 dan 3), korteks motor primer (BA4), korteks kesatuan somatoderia (BA5), korteks motor suplimen (SMA) dan korteks premotor (BA6) (Grefkes et al. 2008). Selain itu,

serebelum iaitu struktur otak di luar korteks juga mempunyai peranan penting dalam mencetus dan menyelaras tindakan motor (Koeke et al. 2004a, 2004b; Lutz et al. 2005). Korteks berkaitan motor juga terlibat dalam pergerakan lain-lain anggota sama ada secara terkawal atau luar kawal misalnya korteks kesatuan somatoderia (BA7) dalam lobus parietal superior berfungsi dalam penentuan lokasi objek di dalam ruang, mengkoordinasi pergerakan berkemahiran terancang dan pemprosesan visual-ruang,

korteks dorsolateral prefrontal (BA8) berfungsi mengawal pergerakan kelopak mata dan korteks somatoderia primer (BA 1, 2 dan 3) untuk pergerakan lidah dan muka (Trans Cranial Technologies 2012). Malah, terdapat juga korteks berkaitan motor yang terlibat dalam proses kognitif otak seperti ingatan bekerja misalnya korteks motor suplimen (SMA) dan korteks premotor, kedua-duanya dalam kawasan BA6 (Trans Cranial Technologies 2012).

Walau bagaimanapun, tidak banyak kajian terdahulu yang memberi perhatian kepada sifat dan ciri hemodinamik bagi kawasan yang mengalami pengaktifan misalnya kawasan korteks berkaitan motor. Malah, penglibatan beberapa kawasan korteks yang tidak berkaitan dengan motor misalnya lobus parietal superior (SPL) dalam mengkoordinasi gerakan motor juga menjadi suatu yang menarik untuk dikaji. Oleh itu, dalam kajian ini kawasan otak yang bertanggungjawab mengkoordinasi tepikan jari rentak sendiri bilateral dengan empat gaya tepikan akan ditentukan. Model hemodinamik (Friston et al. 2000) kemudiannya akan digunakan untuk menentukan ciri hemodinamik kawasan yang mengalami pengaktifan bererti.

KAEDAH UJI KAJI

Imbasan pengimejan resonans magnet kefungsi (fMRI) dilakukan ke atas seorang subjek lelaki Melayu sihat berumur 41 tahun menggunakan sistem MRI 3T (Model Siemens Magnetom Verio) di Jabatan Radiologi, Pusat Perubatan Universiti Kebangsaan Malaysia. Subjek bersetuju untuk mengambil bahagian dengan mengisi dan menandatangani borang persetujuan menyertai kajian, selepas memahami apa yang akan dilalui dan kemungkinan risiko yang bakal dihadapi. Dalam kajian ini, subjek melakukan empat gaya tepikan jari rentak sendiri iaitu sentuh-perlahan (SP), sentuh-laju (SL), tekan-perlahan (TP) dan tekan-laju (TL) dalam satu imbasan fMRI. Kaedah lengkap mengenai gaya tepikan jari yang dilakukan oleh subjek serta kaedah pemerolehan data fMRI diberikan dalam Yusoff (2013a, 2013b). Data fMRI dianalisis menggunakan pemetaan statistik berparameter (SPM8) (Ahmad et al. 2011; Yusoff et al. 2010).

Pengaktifan otak dan ciri hemodinamik kawasan korteks berkaitan motor dikaji menggunakan perisian SPM8 (Functional Imaging Laboratory, Institute of Neurology, University College of London). Kawasan korteks yang terlibat dalam mengawal tepikan jari pelbagai gaya ditentukan terlebih dahulu. Peratus perubahan isyarat (PSC) korteks berkenaan kemudiannya ditentukan menggunakan perisian MarsBar (Brett et al. 2002). Ini dicapai dengan mengekstrak nilai PSC daripada isi padu sasaran (VOI) berjejari 4 mm yang berpusat pada titik dengan keamatan maksimum bagi setiap korteks yang terlibat. PSC ditakrifkan sebagai nisbah perubahan isyarat resonans magnet di dalam otak semasa ia sedang berfungsi, terhadap purata perubahan isyarat resonans magnet yang dicerap daripada keseluruhan pengukuran. Menggunakan sfera yang sama sebagai perwakilan, purata efisiensi neuron

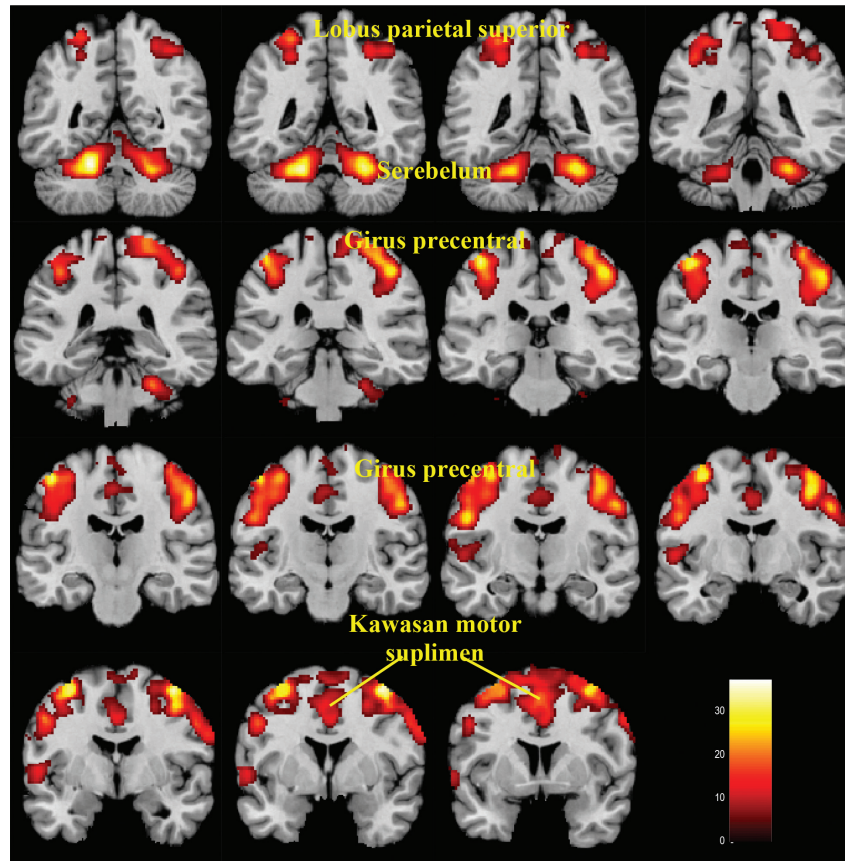
(ϵ), pereputan isyarat (τ_s), suap-balik (τ_r), masa transit (τ_o), parameter kekerasan (α_s) dan ekstrak oksigen keadaan rehat (E_o) bagi kawasan korteks tersebut kemudiannya dianggarkan (Friston et al. 2000). Seterusnya, analisis korelasi Spearman dijalankan bagi menguji kewujudan hubungan antara ketinggian pengaktifan (nilai t) dan PSC, ϵ , τ_s , τ_r , dan τ_o . Keputusan analisis dilaporkan pada $\alpha = 0.05$ (sela keyakinan 95%).

HASIL

Rajah 1 adalah imej statistik purata yang menunjukkan kawasan yang mengalami pengaktifan daripada kesemua gaya tepikan jari rentak sendiri iaitu SP, SL, TP dan TL. Imej statistik tersebut dipaparkan pada koordinat MNI. Koordinat MNI adalah ruang stereotaktik piawai yang disediakan oleh McConnel Brain Imaging Center, Montréal Neurological Institute, McGill University untuk kegunaan pemetaan pengaktifan otak dalam pengimejan sains neuro. Imej statistik yang ditunjukkan adalah mengikut tatacara neurologi dalam pembacaan imej iaitu sebelah kanan imej adalah bahagian kanan otak. Imej statistik yang ditunjukkan dalam Rajah 1 dipenggal pada nilai $t = 4.79$ dan $k = 200$ iaitu hanya kelompok dengan bilangan voksel melebihi 200 dan voksel yang mempunyai nilai $t \geq 4.79$ ditunjukkan sebagai bererti pada aras keertian ($\alpha = 0.05$) yang diperbetulkan. Daripada Rajah 1 didapati pengaktifan bererti tertumpu pada serebelum bilateral dan lobus parietal superior bilateral (baris 1), girus presentral bilateral (baris 2 - 4) dan kawasan motor suplimen (baris 4).

Jadual 1 pula menunjukkan koordinat bagi voksel dengan keamatan maksimum, nilai t dan nilai peratus perubahan isyarat (PSC) serta beberapa parameter hemodinamik bagi kawasan pengaktifan utama iaitu PCG bilateral, serebelum bilateral, SPL bilateral dan SMA untuk setiap gaya tepikan. Dapat diperhatikan kesemua gaya tepikan menunjukkan pengaktifan pada PCG bilateral, serebelum bilateral dan SMA. Bagi SPL, fenomena anjakan kelateralan berlaku iaitu pengaktifan berlaku sama ada di hemisfera kiri atau kanan. Tepikan perlahan hanya mengaktifkan SPL kiri manakala tepikan laju mengaktifkan SPL kanan. Bilangan voksel aktif, nilai t dan peratus perubahan isyarat pula didapati lebih tinggi di SPL kanan semasa tepikan laju berbanding di SPL kiri semasa tepikan perlahan. Keputusan ini dapat diperhatikan dalam Rajah 2 (hanya pengaktifan pada SPL ditunjukkan).

Plot nilai t pada voksel dengan keamatan maksimum bagi kawasan yang dinyatakan dalam Jadual 1 melawan PSC bagi kawasan tersebut ditunjukkan dalam Rajah 3(a). Suatu hubungan antara nilai t dan PSC yang positif, linear, kuat dan bererti ($p < 0.05$, $\rho = 0.67$) dapat diperhatikan. Plot korelasi Spearman bagi nilai t melawan ϵ pada Rajah 3(b) menunjukkan hubungan yang linear, positif dan sederhana kuat serta tidak bererti ($p = 0.08$, $\rho = 0.40$) manakala plot nilai t melawan τ_s dan τ_o masing-masing pada Rajah 3(c) dan 3(d) menunjukkan hubungan yang linear, positif, kuat dan bererti ($p < 0.05$, $\rho = 0.85$, $\rho = 0.88$). Plot nilai t melawan τ_r pula (Rajah 3(e)) menunjukkan hubungan yang



RAJAH 1. Purata pengaktifan otak daripada cara tepikan SP, SL, TP dan TL dalam orientasi koronal ditindan di atas pencontoh imej colin27T1_seg.img berwajaran T1

linear, kuat dan bererti ($p < 0.05$, $p = 0.89$) tetapi negatif. Takrifan bagi kesemua kuantiti hemodinamik yang dikaji akan diberikan dalam bahagian perbincangan.

PERBINCANGAN

Daripada Rajah 1 dan Jadual 1, dapat disimpulkan bahawa tepikan jari rentak sendiri secara SP, SL, TP dan TL menghasilkan pengaktifan pada kawasan otak yang hampir serupa. Kawasan utama yang telah dikenal pasti adalah girus presentral (PCG) bilateral iaitu BA4 dan BA6 (BA = kawasan Brodmann), serebelum bilateral, kawasan motor tambahan (SMA) iaitu BA6 dan lobus parietal superior (BA7a). Keputusan ini disokong oleh beberapa kajian terdahulu (Blinkenberg et al. 1996; Deiber et al. 1999; Jancke et al. 1998a, 1998b, 2000). BA4 dikenali sebagai kawasan motor utama atau M1 iaitu kawasan yang paling penting dalam mengkoordinasi gerakan anggota badan. Ia terletak pada dinding anterior bagi sulkus tengah. Ia tidak hanya terlibat dalam kawalan gerakan anggota, misalnya jari, bahkan juga memainkan peranan penting dalam penumpuan perhatian terhadap tugas yang dilakukan (Trans Cranial Technologies 2012). BA6 dinamakan korteks premotor. Ia mengunjur secara anterior dari korteks motor primer berhampiran fisur Sylvian (sulkus lateral). Fungsi asas BA6 adalah sebagai pembimbing deria semasa gerakan dan kawalan otot batang dan otot proksimal termasuk

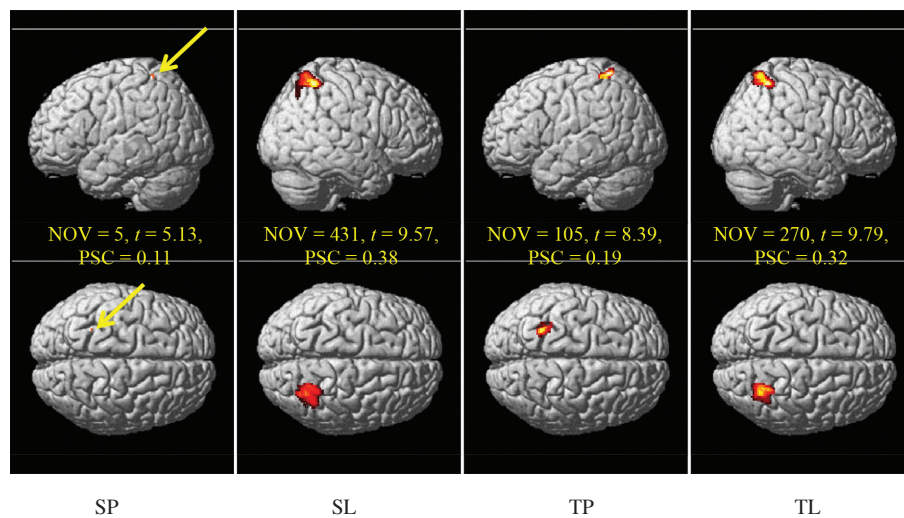
penjujukan dan pengawalan gerakan jari subjek. Turut termasuk di dalam BA6 adalah SMA yang mempunyai peranan sebagai pencetus gerakan. Serebelum bilateral, satu-satunya kawasan di luar korteks yang menunjukkan pengaktifan bererti, memainkan peranan penting dalam koordinasi, kejituan dan ketepatan pemaasaan kawalan gerakan jari subjek, tetapi tidak terlibat dalam mencetus gerakan seperti BA4 dan BA6.

Selain daripada kawasan yang dinyatakan di atas, pengaktifan otak juga dilihat berlaku pada lobus parietal superior bilateral atau BA7a (Rajah 2) yang bertanggungjawab dalam koordinasi visuo-motor dan gerakan berkemahiran terancang. Keputusan yang agak menarik diperolehi daripada kajian ini apabila berlaku anjakan kelateralan pada SPL (Jadual 1 dan Rajah 2). Anjakan kelateralan bermaksud kefungsiannya suatu kawasan otak bertukar dari satu hemisfera ke hemisfera bersebelahan akibat perubahan dalam konteks uji kaji. Dalam kajian ini, SPL kanan yang hanya mengalami pengaktifan semasa tepikan laju membuktikan bukan sahaja SPL terlibat dalam aktiviti berkemahiran terancang bahkan bertanggungjawab mengawal peningkatan laju tepikan. Magnitud pengaktifan otak (ketinggian isyarat dan keluasan kawasan pengaktifan) yang lebih tinggi bagi SPL kanan semasa tepikan laju berbanding SPL kiri semasa tepikan perlahan mengukuhkan lagi keputusan yang ditunjukkan dalam Rajah 2.

JADUAL 1. Ciri pengaktifan otak yang diperoleh daripada empat gaya tepikan jari. Semua voksel dengan keamatan maksimum mengalami pengaktifan secara bererti ($p < 0.05$ diperbetulkan)

| Cara tepikan | Kawasan otak | x | y | z | Nilai t ± 0.01 | PSC/% | ϵ/s^{-1} ± 0.01 | τ_s/s^{-1} ± 0.01 | τ_f/s^{-1} ± 0.01 | τ_o/s ± 0.01 | α ± 0.01 | $E_o/\%$ |
|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-------------------------|-------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|----------|
| SP | PCG kanan | 38 | -6 | 64 | 13.48 | 2.20 | 0.12 | 0.78 | 0.37 | 1.21 | 0.32 | 35 |
| | PCG kiri | -32 | -8 | 64 | 9.61 | 1.94 | 0.14 | 0.74 | 0.38 | 1.15 | 0.32 | 34 |
| | Serebelum kanan | 24 | -50 | -26 | 10.44 | 1.13 | 0.08 | 0.76 | 0.38 | 1.18 | 0.32 | 34 |
| | Serebelum kiri | -18 | -54 | -26 | 12.54 | 1.45 | 0.08 | 0.79 | 0.37 | 1.22 | 0.32 | 34 |
| | SMA | 0 | 2 | 60 | 8.51 | 1.06 | 0.09 | 0.74 | 0.38 | 1.15 | 0.32 | 34 |
| | SPL kanan | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SL | SPL kiri | -28 | -50 | 66 | 5.13 | 0.11 | 0.03 | 0.71 | 0.40 | 1.04 | 0.32 | 34 |
| | PCG kanan | 40 | -6 | 64 | 16.29 | 3.29 | 0.14 | 0.83 | 0.35 | 1.33 | 0.32 | 35 |
| | PCG kiri | -34 | -10 | 64 | 14.89 | 3.69 | 0.19 | 0.79 | 0.35 | 1.29 | 0.32 | 35 |
| | Serebelum kanan | 26 | -52 | -24 | 14.98 | 1.91 | 0.10 | 0.83 | 0.34 | 1.33 | 0.32 | 35 |
| | Serebelum kiri | -20 | -56 | -22 | 16.94 | 2.14 | 0.11 | 0.86 | 0.33 | 1.40 | 0.32 | 35 |
| | SMA | 4 | 2 | 52 | 9.99 | 1.66 | 0.09 | 0.81 | 0.36 | 1.30 | 0.32 | 35 |
| TP | SPL kanan | 30 | -62 | 66 | 9.57 | 0.38 | 0.03 | 0.65 | 0.41 | 0.99 | 0.32 | 34 |
| | SPL kiri | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | PCG kanan | 40 | -6 | 64 | 15.88 | 3.20 | 0.17 | 0.84 | 0.34 | 1.32 | 0.32 | 35 |
| | PCG kiri | -36 | -10 | 62 | 13.47 | 2.82 | 0.21 | 0.80 | 0.36 | 1.21 | 0.32 | 34 |
| | Serebelum kanan | 24 | -52 | -24 | 13.85 | 1.61 | 0.11 | 0.87 | 0.33 | 1.37 | 0.32 | 35 |
| | Serebelum kiri | -18 | -54 | -24 | 15.97 | 1.95 | 0.11 | 0.89 | 0.32 | 1.40 | 0.32 | 35 |
| TL | SMA | 0 | 2 | 58 | 9.58 | 1.35 | 0.11 | 0.78 | 0.37 | 1.22 | 0.32 | 34 |
| | SPL kanan | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | SPL kiri | -26 | -52 | 68 | 8.39 | 0.19 | 0.06 | 0.66 | 0.41 | 0.99 | 0.32 | 34 |
| | PCG kanan | 40 | -6 | 64 | 17.98 | 3.90 | 0.17 | 0.87 | 0.32 | 1.44 | 0.32 | 35 |
| | PCG kiri | -34 | -10 | 64 | 16.58 | 4.38 | 0.22 | 0.82 | 0.34 | 1.40 | 0.33 | 35 |
| | Serebelum kanan | 24 | -52 | -24 | 16.95 | 2.19 | 0.10 | 0.88 | 0.31 | 1.48 | 0.32 | 35 |
| TL | Serebelum kiri | -18 | -56 | -24 | 17.68 | 2.23 | 0.10 | 0.90 | 0.30 | 1.48 | 0.32 | 35 |
| | SMA | 4 | 2 | 52 | 9.26 | 1.62 | 0.08 | 0.77 | 0.37 | 1.23 | 0.32 | 35 |
| | SPL kanan | 30 | -60 | 66 | 9.79 | 0.32 | 0.04 | 0.66 | 0.41 | 0.99 | 0.32 | 34 |
| | SPL kiri | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

SP = Sentuh Perlahan; SL = Sentuh Laju; TP = Tekan Perlahan; TL = Tekan Laju



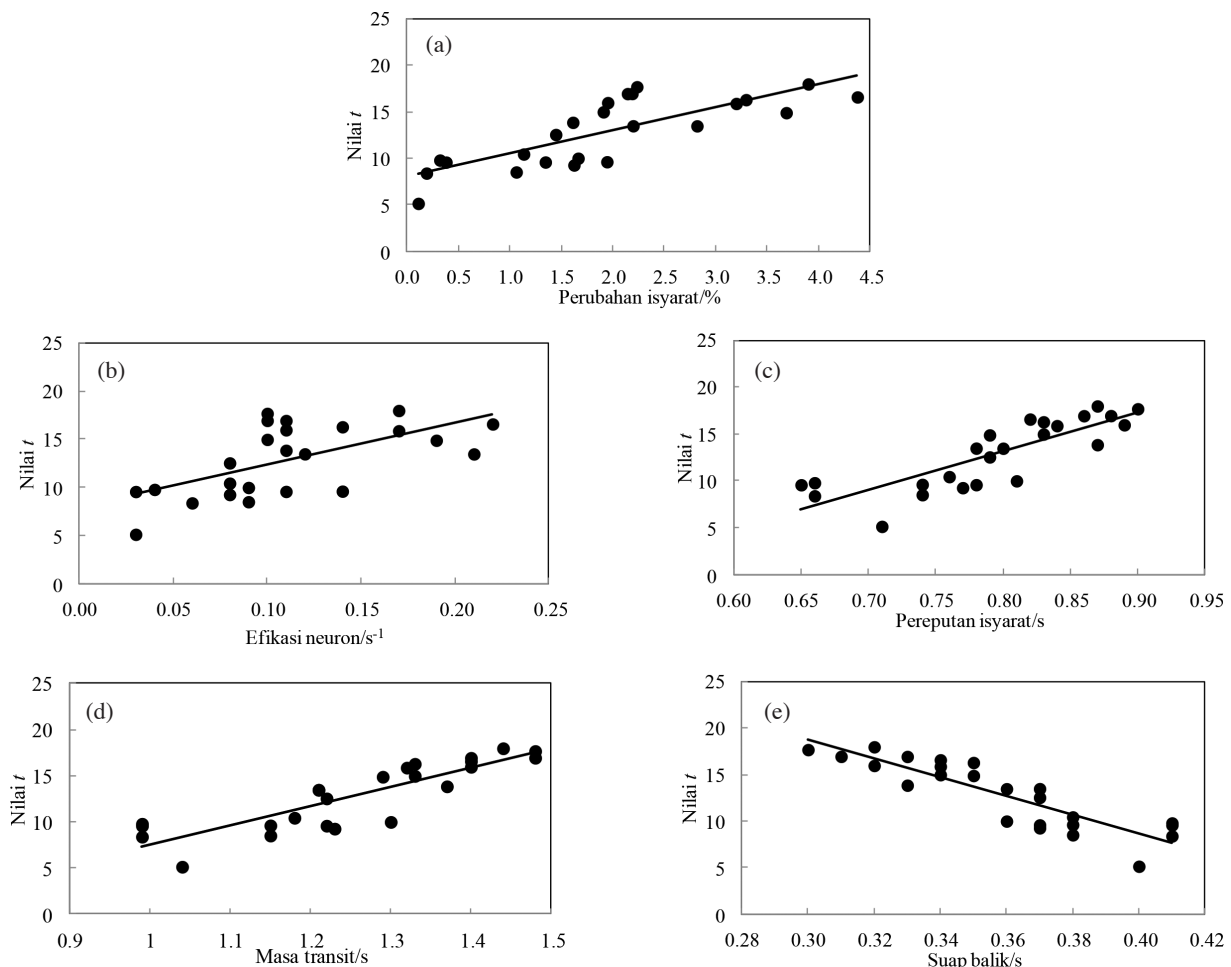
RAJAH 2. Pandangan sisi (atas) dan pandangan atas (bawah) imej tiga dimensi otak menunjukkan magnitud pengaktifan yang berbeza bagi lobus parietal superior (SPL) untuk keempat-empat cara tepikan (NOV = bilangan voksel aktif)

Peningkatan secara linear nilai t apabila PSC meningkat (Rajah 3(a)) adalah wajar memandangkan nilai t ditakrifkan sebagai nisbah kesan saiz terhadap varians bagi sesuatu voksel manakala PSC pula ditakrifkan sebagai nisbah purata perubahan isyarat bagi suatu keadaan eksperimen terhadap purata perubahan isyarat keseluruhan pengukuran dalam satu sesi uji kaji fMRI. Jika diandaikan kesan saiz bagi suatu voksel adalah berkadar dengan jumlah perubahan isyarat bagi suatu kelompok voksel untuk satu-satu keadaan eksperimen, dengan sebab perubahan isyarat setiap voksel dalam satu kelompok voksel yang mengalami pengaktifan menyumbang kepada purata isyarat resonans magnet kelompok tersebut, maka suatu hubungan positif dan linear antara nilai t dan PSC semestinya diperoleh seperti yang dapat dilihat pada Rajah 3(a).

Dua daripada enam parameter hemodinamik dalam Jadual 1 iaitu parameter kekerasan (α) dan ekstraksi oksigen keadaan rehat (E_o) tidak menunjukkan kebergantungan terhadap nilai t . Nilai α untuk kesemua kawasan dan untuk semua cara tepikan adalah 0.32. Menurut Friston et al. (2000), pengaliran keluar darah daripada kawasan pengaktifan otak adalah fungsi kepada isi padu (model windkessel) melalui persamaan $f_{\text{keluar}}(V)$

$= V^{1/\alpha}$, yang bebas daripada kebergantungan terhadap kesan saiz. Persamaan ini memodel kapasiti menyerupai belon bagi vena semasa mengusir keluar darah pada kadar yang lebih tinggi apabila ia mengembang. Hasil kajian tomografi pancaran positron (PET), dalam keadaan pengaliran mantap mendapati nilai α adalah 0.38 (Grubb et al. 1974). Mandeville et al. (1999) pula mendapati nilai α menjadi semakin kecil ($\alpha=0.18$) apabila pengaliran dan isi padu darah berubah secara dinamik. Nilai α sebesar 0.33 telah diperoleh dalam satu kajian ke atas subjek tunggal (Friston et al. 2000) dan dibincangkan sebagai kesan daripada isi padu dan pengaliran yang saling berada dalam keadaan fluks yang selanjur semasa respons dalam otak dibangkitkan. Nilai $\alpha=0.32$ yang diperoleh daripada kajian ini memberikan $1/\alpha = \gamma + \beta = 3.13$. Untuk pengaliran laminar, $\gamma=2$, memberikan $\beta=1.13$ (≈ 1) iaitu pengaliran mantap kerana nilai $\beta > 1$ memodel isi padu darah pada tekanan tinggi yang semakin berkurangan (Mandeville et al. 1999).

E_o adalah pecahan oksigen yang diekstrak semasa keadaan rehat. Nilai E_o yang diperoleh untuk kelima-lima kawasan bagi kesemua cara tepikan adalah sebesar 34-35%. Julat yang diketahui untuk E_o adalah antara 20-55%



RAJAH 3. Plot nilai t melawan a) peratus perubahan isyarat, b) efikasi neuron, pereputan isyarat, c) masa transit dan d) suap balik bagi kesemua kawasan yang ditunjukkan dalam Jadual 1

(Friston et al. 2000). Oksigen yang dihantar ke otak melalui salur darah akan diekstrak sama ada semasa keadaan aktif atau rehat dan nilai ini menjadi tinggi dalam kawasan otak dengan pengaliran darah yang rendah atau dalam tisu yang mempunyai sifat mengekstrak oksigen yang tinggi secara endogenus (Friston et al. 2000). Keputusan yang diperoleh menunjukkan bahawa kesemua kawasan yang dikaji mempunyai keupayaan mengekstrak oksigen yang sama dan keupayaan tersebut tidak mempengaruhi nilai t bagi voksel dengan keamatan maksimum tetapi mempunyai pengaruh ke atas rupa bentuk respons BOLD (kebergantungan kepada aras oksigen darah) bagi voksel tersebut.

Tiga parameter hemodinamik berikutnya iaitu efikasi neuron (ϵ), pereputan isyarat (τ_s) dan masa transit (τ_o), Rajah 3(b) – 3(d) menunjukkan hubungan yang linear dan positif dengan nilai t . Akan tetapi hanya τ_s dan τ_o menunjukkan hubungan yang bererti. Keputusan yang peroleh oleh (Friston et al. 2000) untuk ketiga-tiga parameter hemodinamik ini menunjukkan berlaku perubahan dalam magnitud respons BOLD tetapi tidak menunjukkan hubungan dengan nilai t . Peningkatan secara linear dan positif terhadap nilai t seperti yang diperoleh dalam kajian ini adalah wajar kerana ketiga-tiga parameter ini berkait rapat dengan sifat dinamik bagi isyarat BOLD setiap voksel dan ketinggian isyarat BOLD pula berkadar dengan kesan saiz yang mana untuk suatu voksel, hubungannya dengan nilai t voksel tersebut diberikan oleh $t = \text{kesan saiz}/\sqrt{\text{varians isyarat}}$. Efikasi neuron mencerminkan potensi suatu stimulus dalam mencungkil respons neuron dan seterusnya efikasi respons neuron yang dijana dalam mengaruh isyarat sinaps (Friston et al. 2000). Nilai ϵ bagi kesemua kawasan pengaktifan yang dikaji berada dalam julat 0.08 hingga 0.22. Pereputan isyarat mencerminkan tempoh yang diambil untuk suatu isyarat lenyap. Nilai yang diperoleh berada dalam julat 0.7 hingga 0.9 s dan meningkat dengan nilai t . Masa transit pula secara efektifnya ditakrifkan sebagai nisbah isi padu vena keadaan rehat terhadap pengaliran keadaan rehat. Bermakna, ia adalah masa yang diambil untuk sel darah mengalir melalui ruang petak vena. Dalam kajian ini, $1.1 \text{ s} < \tau_o < 1.5 \text{ s}$ untuk kesemua kawasan yang dikaji dan menunjukkan peningkatan dengan nilai t .

Parameter hemodinamik terakhir adalah suap balik. Berlainan dengan parameter yang dinyatakan di atas, nilai t berkurang dengan peningkatan suap balik. Parameter τ_f adalah pemalar masa bagi mekanisme pengatur automatik suap balik. Berdasarkan model hemodinamik satu masukan-satu keluaran yang dicadangkan oleh Friston et al. (2000), isyarat sinaps yang dicetus oleh respons neuron mempengaruhi pengaliran darah ke kawasan otak berkenaan. Pengaliran darah ini pula akan memberi maklumat suap balik secara automatik kepada aktiviti sinaps kawasan berkenaan sama ada untuk meningkatkan atau mengurangkan isyarat sinaps supaya pengaliran dapat ditingkatkan atau dikurangkan. Pengaliran yang ditingkatkan akan menyebabkan isi padu darah dan kuantiti deoksihemoglobin yang diusir keluar meningkat

dan seterusnya meningkatkan isyarat BOLD. Daripada keputusan yang diperoleh, nilai t yang meningkat dengan pengurangan suap balik bersesuaian dengan model yang dicadangkan. Ini kerana, nilai t berkait rapat dengan isyarat BOLD dan bagi voksel yang mempunyai isyarat yang tinggi, tidak memerlukan suap balik yang tinggi dikenakan kepada aktiviti sinaps menyebabkan pemalarnya berkurangan.

KESIMPULAN

Aktiviti tepikan jari pelbagai gaya yang dikaji mengaktifkan kawasan otak sepunya iaitu girus presentral bilateral, serebelum bilateral, lobus parietal superior bilateral dan kawasan motor tambahan. Selain girus presentral dan kawasan motor suplimen yang dikategorikan sebagai kawasan korteks berkaitan motor, serebelum adalah kawasan otak di luar korteks yang memainkan peranan utama dalam mengkoordinasi tepikan jari pelbagai cara. Kawasan korteks yang bukan berkaitan motor iaitu lobus parietal superior turut menunjukkan pengaktifan bererti. Magnitud pengaktifan pada SPL kiri yang lebih rendah berlaku semasa tepikan perlahan berbanding tepikan laju yang memperlihatkan pengaktifan yang lebih tinggi pada SPL kanan mencadangkan kewujudan anjakan kelateralan. Ini menjelaskan lagi peranan yang dimainkan SPL dalam mengkoordinasi pergerakan berkemahiran terancang. Parameter hemodinamik yang mempengaruhi ketinggian pengaktifan adalah efikasi neuron, pereputan isyarat, masa transit dan suap balik. Sementara ketinggian isyarat meningkat secara linear dengan peningkatan efikasi neuron, pereputan isyarat dan masa transit, peningkatan suap balik menyebabkan ketinggian isyarat berkurang secara linear.

PENGHARGAAN

Penghargaan ditujukan kepada Jabatan Radiologi, Pusat Perubatan Universiti Kebangsaan Malaysia (PPUKM) di atas kebenaran menggunakan pengimbas MRI dan kepada Sa'don Samian dan Khairiah Abdul Hamid di atas bantuan menjalankan imbasan fMRI ke atas subjek. Penyelidikan ini dibiayai oleh geran penyelidikan eScience Fund 06-01-02-SF0548, Kementerian Sains, Teknologi dan Inovasi Malaysia.

RUJUKAN

- Ahmad, N.Z., Ismafairus, A.H.A., Khairiah, A.H., Kamil, W.W.A., Mazlyfarina, M. & Hanani, A.M. 2011. Functional specialisation and effective connectivity during self-paced unimanual and bimanual tapping of hand fingers: An extended analysis using dynamic causal modeling and Bayesian model selection for group studies. *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences* 7(2): 17-36.
- Blinkenberg, M., Bonde, C., Holm, S., Svarer, C., Andersen, J., Paulson, O.B. & Law, I. 1996. Rate dependence of regional cerebral activation during performance of a repetitive motor task: A PET study. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism* 16(5): 794-803.

- Brett, M., Anton, J.-L., Valabregue, R. & Poline, J.-B. 2002. Region of interest analysis using an SPM toolbox. *Proceedings of the 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain* Jun 2 – 6: Sendai Japan. Terdapat dalam CD-ROM dalam *NeuroImage*.
- Deiber, M.P., Honda, M., Ibanez, V., Sadato, N. & Hallett, M. 1999. Mesial motor areas in self-initiated versus externally triggered movements examined with fMRI: Effect of movement type and rate. *Journal of Neurophysiology* 81(6): 3065-3077.
- Friston, K.J., Mechelli, A., Turner, R. & Price, C.J. 2000. Nonlinear responses in fMRI: The Balloon model, Volterra kernels, and other hemodynamics. *NeuroImage* 12(4): 466-477.
- Grefkes, C., Eickhoff, S.B., Nowak, D.A., Dafotakis, M. & Fink, G.R. 2008. Dynamic intra- and interhemispheric interactions during unilateral and bilateral hand movements assessed with fMRI and DCM. *NeuroImage* 41(4): 1382-1394.
- Grubb, R.L. Jr., Raichle, M.E., Eichling, J.O. & Ter-Pogossian, M.M. 1974. The effects of changes in PaCO₂ on cerebral blood volume, blood flow, and vascular mean transit time. *Stroke* 5(5): 630-639.
- Jancke, L., Peters, M., Himmelbach, M., Nosselt, T., Shah, J. & Steinmetz, H. 2000. fMRI study of bimanual coordination. *Neuropsychologia* 38(2): 164-174.
- Jancke, L., Peters, M., Schlaug, G., Posse, S., Steinmetz, H. & Muller-Gartner, H. 1998a. Differential magnetic resonance signal change in human sensorimotor cortex to finger movements of different rate of the dominant and subdominant hand. *Brain Research. Cognitive Brain Research* 6(4): 279-284.
- Jancke, L., Specht, K., Mirzazade, S., Loose, R., Himmelbach, M., Lutz, K. & Shah, N.J. 1998b. A parametric analysis of the 'rate effect' in the sensorimotor cortex: A functional magnetic resonance imaging analysis in human subjects. *Neuroscience Letters* 252(1): 37-40.
- Koeneke, S., Lutz, K., Wustenberg, T. & Jancke, L. 2004a. Bimanual versus unimanual coordination: What makes the difference? *NeuroImage* 22(3): 1336-1350.
- Koeneke, S., Lutz, K., Wustenberg, T. & Jancke, L. 2004b. Long-term training affects cerebellar processing in skilled keyboard players. *Neuroreport* 15(8): 1279-1282.
- Lutz, K., Koeneke, S., Wustenberg, T. & Jancke, L. 2005. Asymmetry of cortical activation during maximum and convenient tapping speed. *Neuroscience Letters* 373(1): 61-66.
- Mandeville, J.B., Marota, J.J., Ayata, C., Zaharchuk, G., Moskowitz, M.A., Rosen, B.R. & Weisskoff, R.M. 1999. Evidence of a cerebrovascular postarteriole windkessel with delayed compliance. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism* 19(6): 679-689.
- Trans Cranial Technologies. 2012. Cortical Functions Reference. <http://www.trans-cranial.com/manuals>. Tarikh capaian 30 Mei 2012 12.36 pm.
- Yusoff, A.N., Mohamad, M., Hamid, A.I.A., Wan Abdullah, W.A.K., Hashim, M.H. & Zulkifli, N.Z. 2010. Functional specialisation and effective connectivity in cerebral motor cortices: An fMRI study on seven right handed female subjects. *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences* 6(2): 71-92.
- Yusoff, A.N. 2013a. Interaksi psikofisiologi antara girus presentral dan lobus parietal superior kanan. *Sains Malaysiana* 42(6): 765-771.
- Yusoff, A.N. 2013b. Kesan daya dan laju tepikan jari ke atas pengaktifan korteks berkaitan motor. *Jurnal Sains Kesihatan Malaysia* 11(2) 2013: 41-49.
- Program Pengimejan Diagnostik & Radioterapi
Pusat Pengajian Sains Diagnostik & Kesihatan Gunaan
Fakulti Sains Kesihatan, Universiti Kebangsaan Malaysia
Jalan Raja Muda Abdul Aziz, 50300 Kuala Lumpur
Malaysia
- *Pengarang untuk surat-menyurat; email: nazlim@fsk.ukm.my
- Diserahkan: 31 Disember 2012
Diterima: 15 Mei 2013