

ソースコード中の変数と条件分岐による脳活動の差

幾谷 吉晴 上野 秀剛

本論文では NIRS を用いてプログラム理解における 1) 数値計算, 2) 変数の記憶, 3) 条件分岐の判断が脳活動へ及ぼす影響を調査する. 20 人の被験者に 3 種類のコード片を理解する課題と, 3 段階の難易度の暗算を行う課題を与え, 前頭極を計測する実験を行う. 実験の結果, 暗算の難易度によって脳活動に差が見られない一方で, 変数の記憶を必要とする課題において有意に高い脳活動が見られた. 結果は NIRS を用いた脳活動計測によりプログラム理解における記憶への負荷を評価できる可能性を示している.

In this paper, we examine brain activity in program comprehension that contains the effects of 1) calculation, 2) memorizing variables, and 3) judging conditional branch. We measured Frontal pole of twenty subjects at three types code reading tasks and three level mental calculation tasks using NIRS. The result of the experiment showed a significantly higher brain activity at the variables-memorizing task. On the other hand, no significant difference was observed between different levels of mental calculation task. The results suggest that brain activity at Frontal pole indicate a workload of memorizing in program comprehension.

1 はじめに

プログラムを理解することは開発のみならず拡張や保守など様々な工程で必要となる基本的な作業の 1 つである. プログラム理解の効率化は開発工程全体の効率化に繋がるため, 開発者の行動分析に基づいた教育方法や支援手法の開発が行われている. しかし, プログラム理解の過程は外部からの計測が難しく, 直接的・定量的な評価が難しい.

プログラム理解のような人間が頭の中で行う認知活動を分析する方法として, 脳活動計測がある. 言語学の分野においては文章の理解時や発声時の

脳活動を計測することで, 言語の理解や認知における脳の働きを定量的に評価している [3][7]. 脳活動を非侵襲に計測する装置として近赤外線光を用いる NIRS(Near-Infrared Spectroscopy)[2] や, 磁場を利用する fMRI(functional Magnetic Resonance Imaging), 神経活動に起因した電流の変化を測る EEG(Electroencephalogram) などがある. プログラム理解の分野においても, 脳活動に着目した研究が少数ながら存在する [10][11]. 脳活動を定量的に計測することで, 既存の脳機能研究の結果に基づいたプログラム理解に必要な能力の分析や作業支援手法の開発が可能になる.

本研究では, プログラム理解を複数の認知活動から構成される複合的な活動と仮定し, 被験者実験でそれぞれを行う際の脳活動の違いを調査する. 本稿ではプログラム理解において重要と考えられる活動, 1) 数値計算, 2) 変数の記憶, 3) 条件分岐の判断における脳活動を NIRS で計測する. NIRS は他の脳活動計測装置と比べて身体的な拘束が少なく, 被験者へ与える疲労が小さいため, タスクあたりの計測時間が 1 分を超えるプログラム理解の計測に適している. また,

Difference in Brain Activity by Variable and Conditional Branch in Source Code.

Yoshiharu Ikutani, 奈良工業高等専門学校専攻科電子情報工学専攻, National Institute of Technology, Nara college.

Hidetake Uwano, 奈良工業高等学校情報工学科, National Institute of Technology, Nara college.

コンピュータソフトウェア, Vol.32, No.3(2015), pp.84-90. [研究論文 (レター)] 2015 年 2 月 9 日受付.

本論文は第 21 回ソフトウェア工学の基礎ワークショップ (FOSE2014) の発表論文を発展させたものである.

時間分解能が高いため、複数の認知活動が作用し時間的変化にも関心の高いプログラム理解研究に適している。実験では四則演算のみを含むコード片、四則演算と変数記憶を含むコード片、四則演算と変数記憶、および条件分岐を含むコード片を理解する際の脳活動を計測する。

2 関連研究

2.1 神経科学における脳活動計測

fMRI や NIRS に代表される脳イメージング機器の進化に伴い、人間の数値計算や言語理解などさまざまな分野で脳活動計測を利用した研究が行われている。一般的に神経科学の分野においては、着目する活動に関連する脳部位を特定した後に、活動に関係する能力を細分化し、どの能力が脳部位の活性化と関連するか特定するアプローチが取られる。

Ferstl らは自然言語で記述された文章を理解する際の文脈推定機能に関連する脳部位を実験で調査し、前頭前野背外側部が活性化したことを示している [3]。また、彼らは文章の文脈を理解するための能力として 1) 論理的な文脈の理解と、2) 文章が表現する感情的な文脈の理解の 2 つに着目した実験を行い、前頭前野背外側部が感情的な面における文脈の推定によって活性化することを示している [4]。数値計算の機能に関する研究においても、Menon らが数値計算を行うときに角回が活発化することを報告している [9]。数値計算の機能には 1) 実際に数値を計算する能力と、2) 記憶として蓄積された簡易な計算結果を参照する能力が考えられる。Grabner らは角回の活発化は計算結果を記憶から参照するとき起こることを確認している [6]。

着目する活動に関連する脳部位の特定と、脳部位が関連する機能の詳細な分析を個別に行う理由として、計測する装置によって計測できる脳部位が限定されること、それぞれの計測に適したタスク設定が異なることなどが考えられる。プログラム理解を対象とした脳活動の計測においても、プログラム理解と関連する脳部位を特定する実験と、その部位がプログラム理解という活動を構成する複数の機能のうち、どれと関連するか分析する実験の双方が必要になる。

著者らは、プログラム理解を記憶や計算、文脈の理解など様々な機能を統合して行われる高次な活動としてとらえている。本稿ではプログラム理解に必要なとなる機能を脳活動から分析する前段階として、プログラム理解において重要と思われる 3 つの要素 (記憶、数値計算、条件分岐の理解) を対象とし、脳部位のひとつである前頭極の脳活動を分析する。

2.2 ソフトウェア工学における脳活動計測

Siegmund らは fMRI を用いてプログラム理解における脳の部位ごとの活性化を調査している [11]。最大 18 行の短いソースコードを理解するタスクを対象とした実験の結果、問題解決、記憶、および文章理解に関連する脳領域がプログラム理解時に活発になることを示している。中川らはプログラムをメンタルシュミレーションする際の前頭葉の脳血流を NIRS で計測している [10]。実験の結果は、変数や制御構造を難読化したプログラムの理解時に脳活動が増加すること、課題の序盤から中盤にかけて脳血流値の正の変化量が最大になることを示している。

プログラム理解には変数の記憶や条件分岐の理解など多くの認知活動が含まれており、それぞれに対して異なる能力や支援が必要と考えられる。プログラムに含まれる様々な要素とそれに対応する認知活動、およびその影響の強さを脳活動という観点から個別に計測することで開発者の支援や教育に有用な知見が得られると期待される。また、プログラム理解を構成する複数の認知活動に対して、どのような認知活動の影響を NIRS による計測で評価できるか明らかにすることは、脳活動計測を用いた開発者の評価において重要である。本研究では、着目する認知活動 (変数の記憶、条件分岐の理解) のみが差分になるよう調整した課題を行うことで、それぞれの認知活動が被験者の脳活動へ与える影響を計測する。

3 NIRS による脳活動の計測

3.1 NIRS

NIRS は脳内の神経活動の増加にともない発生する血流変化を測定することで、間接的に脳活動の変化をとらえる手法である。脳のある部位で神経活動

が増加すると酸化ヘモグロビン (Oxy-Hb) が増加し、脱酸化ヘモグロビン (deOxy-Hb) が減少する [2] [8]. NIRS は近赤外線光を頭部に照射し、その反射光から Oxy-Hb と deOxy-Hb の変化量を計測する. 特に Oxy-Hb は血流変化をよく反映する [8] ため、NIRS を用いた脳活動測定の評価値としてよく用いられる.

現在広く利用されている NIRS の問題点として、ヘモグロビン濃度の絶対値を計測できず、頭部組織の厚みが異なる個人間や部位間の比較が困難である点が挙げられる [13]. そのため、NIRS で計測した脳活動信号の値は計測開始時を基準とした相対値となる. また、伝送ケーブルの揺れや被験者の体動、心拍や呼吸など生理活動に影響を受ける [1] ため、データの解析に際しては適切なノイズ除去処理が必要となる.

3.2 多重解像度解析によるノイズ除去

図 1 に本稿の実験において NIRS で計測した脳活動の例を示す. 横軸はタスク開始からの時間、縦軸は Oxy-Hb の数値を示す. 脳血流は数秒かけて増加・減少することが知られており [12], 図の波形に含まれるような高周波のスパイクはノイズである.

タスクによる脳活動の変化を分析するために、本稿では綱島らの提案する離散ウェーブレット変換による多重解像度解析を用いてノイズを除去する [13]. 離散ウェーブレット変換は時間情報を保持したまま、任意の波を周波数の異なる複数の成分に分解する変換手法である. 図 2 に離散ウェーブレット変換で図 1 の信号を近似成分と詳細成分に分解した結果を示す. 図の $d1$ から $d15$ は詳細成分で、それぞれが異なる周波数を持っている. この中で 1Hz 以上の成分 ($d1$ から $d7$) は、体動などに起因した計測ノイズである

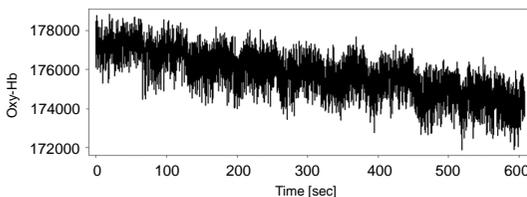


図 1 NIRS で計測した脳活動信号

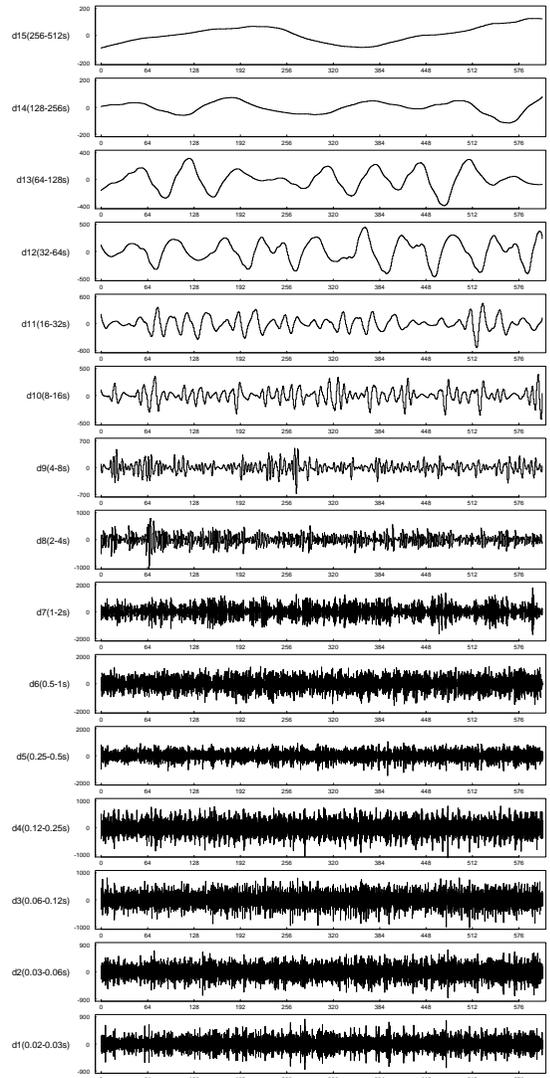


図 2 離散ウェーブレット変換による信号の分解

と考えられる. また 0.015–0.50Hz の成分 ($d8$ および $d9$) は呼吸の周期と一致するため呼吸によるノイズ, 0.005–0.15Hz の成分 ($d10$ および $d11$) は Mayer 波の周期と一致する [1] ことから、血圧変動に起因したノイズと考えられる. $d1$ から $d11$ までの成分を除去し、他の成分から信号を再構成することで、計測データ中に混入したノイズを除去できる.

3.3 標準得点化処理

NIRS によって計測されたデータは開始時を基準と

した相対的な変化量であるため、そのままでは被験者間の比較や統計処理ができない。本稿では、ウェーブレット変換によるノイズ除去後の信号を標準得点化することで、被験者間の測定値の比較や統計処理を可能にする綱島らの手法[13]を用いる。ノイズ除去後のデータを平均が0、標準偏差が1になるように次の式によって標準得点化する。ここで X はノイズ除去後のデータ、 μ は X の平均、 σ は X の標準偏差である。

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

4 実験

変数と条件分岐の影響を計測するプログラム課題と、暗算難易度の影響を計測する暗算課題を行う。

4.1 計測条件

TMS international BV 製の NeXus10 - MarkII を用いて、128Hz のサンプリング周波数で脳活動を計測する。計測部位は、作業記憶やエピソード記憶など記憶に関する機能[5] や計画的な行動などの高次な機能に関連するとされる前頭極 (前頭葉の前方部分) とする。

被験者は奈良高専の学生 20 名 (内女性 2 名) で、年齢は 17 歳から 20 歳、全員が右利きでプログラミングの基礎講義を受講済みである。実験前に実験内容を口頭で説明し、同意を得た後に装置を取り付ける。体動によるアーチファクトを抑えるため肘掛けとヘッドレストがあるイスに被験者を座らせ、できるだけ体を動かさないよう指示する。

各課題はタスクと安静状態を交互に実施するブロックデザインで行う。タスクでは画面に表示される問題を 32 秒間連続して解いてもらう。タスクは各課題で 3 種類用意し、順に 1 度ずつ実施するセットを 3 回行ってもらう。被験者の体動や発話によるノイズを抑制するため、解答の発話や入力には行わず、一定間隔で自動的に問題を切り替える。安静状態では 32 秒間、画面に提示される十字記号を注視し、安静にしてもらう。すべての被験者はプログラム課題、暗算課題の順に計測する。

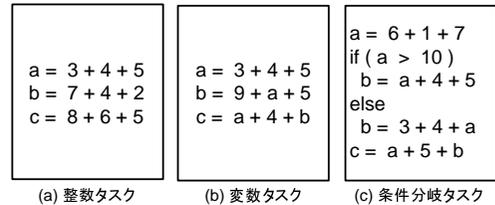


図 3 プログラム課題のタスク

4.2 プログラム課題

図 3 に示す整数、変数、条件分岐の 3 種類のタスクから構成される。各タスクでは被験者に 3 つの変数に格納される値を求めてもらう。

- 整数タスク：各変数の値が整数から計算される。
- 変数タスク：各変数の値が整数と変数から計算されるため、変数値を記憶する必要がある。
- 条件分岐タスク：各変数の値が整数と変数から計算される。計算には変数値を記憶した上で条件分岐を判断する必要がある。

整数タスクと変数タスクの差から変数による影響を、変数タスクと条件分岐タスクの差から条件分岐による影響を分析する。本実験では問題が一定間隔で自動的に切り替わるため、1 問あたりの時間が長すぎるとタスク中になにもしない時間が生じてしまい、タスクの内容にかかわらず脳活動が低下する恐れがある。そこで本稿ではタスクに含まれる変数や条件分岐の数に合わせて各タスクの出題数を調整する。プログラム課題では整数タスクで 4 問 (8 秒/問)、変数タスクで 3 問 (10.6 秒/問)、条件分岐タスクで 2 問 (16 秒/問) 出題する。

4.3 暗算課題

プログラム課題に含まれる暗算の難易度が脳活動に与える影響を計測するための課題で、図 4 に示す 3 種類の難易度の暗算を行うタスクから構成される。各タスクでは被験者に画面に提示される式の解を暗算で求めてもらう。

- 低タスク：1 桁の整数 2 つによる繰り上がりの無い足し算。
- 中タスク：1 桁の整数 3 つによる足し算。
- 高タスク：小数点の引き算と割り算。

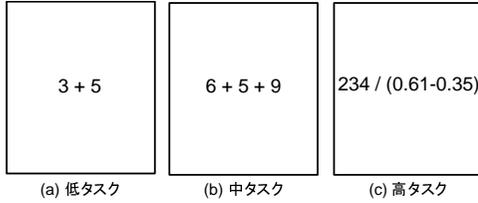


図 4 暗算課題のタスク

暗算課題においてもタスク中になにもしない時間が生じないように、タスクごとの出題数を調整する。暗算課題では低タスクで 16 問 (2 秒/問)、中タスクは 10 問 (3.2 秒/問)、高タスクは 2 問 (16 秒/問) 出題する。

4.4 評価方法

評価には、課題の傾向をよく反映する [8] とされる Oxy-Hb を用いる。図 2 に示した詳細成分の内、タスクと安静状態の時間の和である 64 秒の周期を持つ $d13$ および、前後成分である $d12$ と $d14$ が、タスクに関連した脳活動変化を反映している可能性が高い。そこで、実験で計測した Oxy-Hb の信号を離散ウェーブレット変換で分解し、 $d12$, $d13$ および $d14$ から信号を再構成した上で標準得点化する。

タスクによる脳の活動量として、直前の安静状態における Oxy-Hb の平均値を基準としたタスク中の変化量を用いる。タスク t における Oxy-Hb (データ数 n_t) の計測値 t_i ($i = 0, 1, \dots, n_t$) と、 t の直前の安静状態 r における Oxy-Hb の計測値 r_i ($i = 0, 1, \dots, n_r$) から、安静状態の平均値 (基準値) $rest$ とタスクによる活動量 $activity$ を求める。

$$rest = \frac{1}{n_r} \sum_{i=0}^{n_r} r_i$$

$$activity = \sum_{i=0}^{n_t} (t_i - rest) \cdot \tau$$

ここで、 τ はデータのサンプリング周波数の逆数である。 $activity$ は各タスクにおける基準値からの変化の和を表し、値が高いほどタスクによる脳活動の増加が大きいことを示す。

5 結果と考察

5.1 プログラム課題

図 5 にプログラム課題における全被験者の標準得点化後の Oxy-Hb を加算平均した結果を示す。縦軸が Oxy-Hb、横軸が実験開始からの時間を示し、上部の矢印はタスクの種類と期間を示す。図はタスク時に脳活動が増加し、安静時に減少していることを表している。また変数タスクが他のふたつのタスクに比べて値が高く、直前の安静状態から大きく増加する傾向がある。

図 6 に全被験者の各タスクにおける $activity$ を示す。図は変数タスクが他のタスクに比べて値が高いことを示している。多重比較 (Ryan 法) の結果、整数-変数タスク間および、変数-条件分岐タスク間で有意な差 ($p < 0.05$) が見られた。

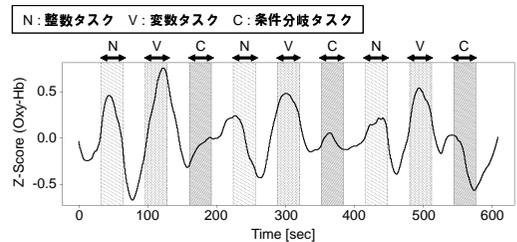


図 5 プログラム課題時の脳活動変化

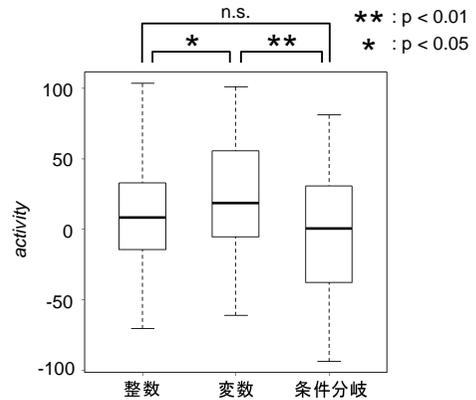


図 6 プログラム課題における各タスクの脳活動

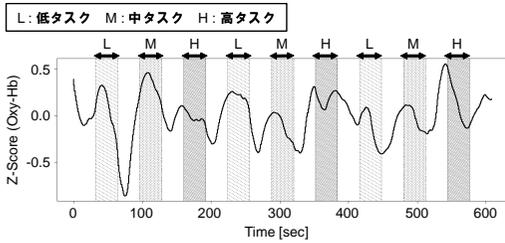


図 7 暗算課題時の脳活動変化

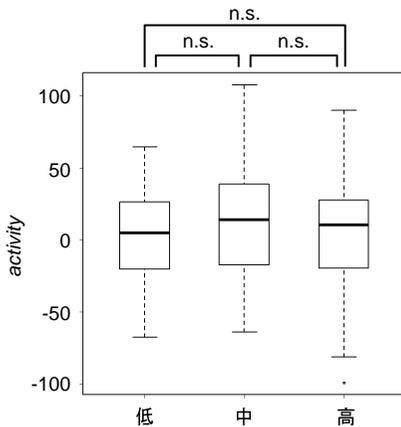


図 8 暗算課題における各タスクの脳活動

5.2 暗算課題

暗算課題の結果を図 7 に示す。1 セット目の中タスクに大きな増加が見られるが、2 セット目では低タスクと高タスクが増加しており、反対に中タスクで脳活動が減少している。図 8 に全被験者の各タスクにおける *activity* を示す。いずれの組み合わせにおいても値に大きな違いは見られず、多重比較 (Ryan 法) でも有意差は見られなかった。

5.3 プログラム理解時の脳活動

プログラム課題では変数タスクにおける脳活動が整数タスクと条件分岐タスクよりも有意に高かった。前頭極は作業記憶に関連する部位であり [5]、変数の記憶が必要な変数タスクで整数タスクより負荷が高まったと考えられる。本研究の結果は中川らの研究結果 [10] と同様に、プログラム中の変数の動きを理解することに前頭葉が関わっている可能性を示唆している。

暗算課題でタスク間に差が無かったことは暗算難易度の差が前頭極に現れないことを示している。したがって、変数に格納された 2 桁の値を用いた暗算をする変数タスクと、1 桁の値のみを扱う整数タスクの差に暗算難易度の差が影響している可能性は低いと考えられる。プログラムにはインクリメントに代表される単純な計算が多く含まれるが、前頭極を計測することで簡単な計算の影響を受けずに変数の記憶による負荷を計測できることが示唆される。

整数タスクと変数タスクに有意差があった一方、整数タスクと条件分岐タスクで脳活動に差は見られなかった。本実験の条件分岐タスクは変数が定数以上かどうかで分岐する単純な条件式を用いたため、脳活動に負荷が現れなかった可能性がある。また、タスクの難しさに合わせて問題数を整数タスク (4 問) や変数タスク (3 問) に比べて条件分岐タスク (2 問) で少なくしたため、負荷が小さくなった可能性がある。条件分岐式による脳活動の評価は今後の課題である。

本稿の分析結果はプログラム理解タスクによる負荷と脳活動の増加に関連があることを示す一方で、プログラムに対する理解の度合いや理解の正否との関連については明らかになっていない。プログラムを理解できたかどうかと脳活動の関係を明らかにすることはソフトウェア工学分野における関心事のひとつと考えられ、今後の有用な評価対象といえる。

6 おわりに

本稿ではプログラム理解における変数の記憶と条件分岐の理解が脳活動に与える影響を計測した。実験の結果、変数タスクでそれ以外のタスクより有意に高い脳活動が計測され、プログラム理解における記憶への負荷を評価できる可能性が示された。この知見はプログラム理解時の脳活動を分析する際の手がかりになると考えられる。

本稿では単純なソースコードのみを対象として実験を行った。より規模の大きいソースコードや設計が複雑なソースコードの理解、または要求仕様書などソースコード以外のドキュメントを利用したプログラム理解の分析は今後の課題である。継承やオーバーライドを含むオブジェクト指向プログラムの理解や、レ

ビューによる要求仕様書の妥当性検証における脳活動の計測は興味深い対象である。また、自然言語で書かれた文章の理解能力とプログラム理解能力の関係や、論理的思考能力との関係について分析することも、プログラム理解過程の理解に有用であると考えられる。本研究の応用として、脳活動に基づいた開発者の能力の定量評価が挙げられる。高い開発能力を持つ開発者や熟練度を脳活動から定量的に評価することで、教育支援や採用をより効率的に行えると期待される。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 若手研究 (B) 24700038 の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Coyle, S., Ward, T., Markham, C. and McDarby, G.: On the suitability of near-infrared (NIR) systems for next-generation brain-computer interfaces, *Physiological Measurement*, Vol. 25, No. 4(2004), pp. 815–822.
- [2] Ferrari, M. and Quaresima, V.: A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application, *Neuroimage*, Vol. 63, No. 2(2012), pp. 921–935.
- [3] Ferstl, E. C. and von Cramon, D. Y.: The role of coherence and cohesion in text comprehension: an event-related fMRI study, *Cognitive Brain Research*, Vol. 11, No. 3(2001), pp. 325–340.
- [4] Ferstl, E. C. and von Cramon, D. Y.: What does the frontomedian cortex contribute to language processing: coherence or theory of mind?, *Neuroimage*, Vol. 17, No. 3(2002), pp. 1599–1612.
- [5] Gilbert, S., Spengler, S., Simons, J., Steele, J., Lawrie, S., Frith, C. and Burgess, P.: Functional specialization within rostral prefrontal cortex (area 10): a meta-analysis, *Cognitive Neuroscience, Journal of*, Vol. 18, No. 6(2006), pp. 932–948.
- [6] Grabner, R. H., Ansari, D., Koschutnig, K., Reishofer, G. and Ebner, F.: The function of the left angular gyrus in mental arithmetic: evidence from the associative confusion effect, *Human brain mapping*, Vol. 34, No. 5(2013), pp. 1013–1024.
- [7] Horwitz, B., Amunts, K., Bhattacharyya, R., Patkin, D., Jeffries, K., Zilles, K. and Braun, A. R.: Activation of Broca's area during the production of spoken and signed language: a combined cytoarchitectonic mapping and PET analysis, *Neuropsychologia*, Vol. 41, No. 14(2003), pp. 1868–1876.
- [8] Hoshi, Y., Kobayashi, N. and Tamura, M.: Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 90, No. 5(2001), pp. 1657–1662.
- [9] Menon, V., Rivera, S., White, C., Glover, G. and Reiss, A.: Dissociating prefrontal and parietal cortex activation during arithmetic processing, *Neuroimage*, Vol. 12, No. 4(2000), pp. 357–365.
- [10] Nakagawa, T., Kamei, Y., Uwano, H., Monden, A., Matsumoto, K. and German, D. M.: Quantifying programmers' mental workload during program comprehension based on cerebral blood flow measurement: a controlled experiment, in *Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering(ICSE2014)*, 2014, pp. 448–451.
- [11] Siegmund, J., Kästner, C., Apel, S., Parnin, C., Bethmann, A., Leich, T., Saake, G. and Brechmann, A.: Understanding understanding source code with functional magnetic resonance imaging, in *Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering(ICSE2014)*, 2014, pp. 378–389.
- [12] Strangman, G., Culver, J. P., Thompson, J. H. and Boas, D. A.: A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation, *Neuroimage*, Vol. 17, No. 2(2002), pp. 719–731.
- [13] Tsunashima, H., Yanagisawa, K. and Iwade, M.: Measurement of brain function using near-infrared spectroscopy (NIRS), *Neuroimaging-Methods*, InTech, 2012.



幾谷 吉晴

奈良工業高等専門学校専攻科電子情報工学専攻所属。生体計測に基づいたソフトウェア開発支援手法の研究に従事。IEEE 学生会員。



上野 秀剛

2009 年奈良先端科学技術大学院大学博士課程修了。同年奈良工業高等専門学校情報工学科助教。2015 年より講師。博士(工学)。ソフトウェア開発におけるヒューマンファクタおよび、ユーザビリティの研究に従事。日本ソフトウェア科学会、ヒューマンインタフェース学会、電子情報通信学会、IEEE、ACM 会員。