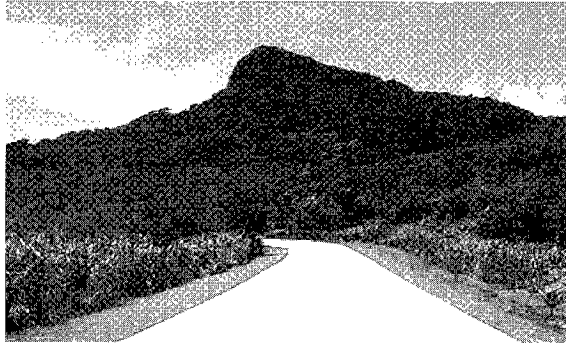


道しるべ： モーバイルプロセス計算へのいざない



富樫 敦 togashi@cs.inf.shizuoka.ac.jp
静岡大学 情報学部情報科学科

モバイル端末花盛り

連日、IT（情報技術）、インターネット、携帯電話などの文字が新聞の紙面を賑わしている。パソコン、携帯電話、インターネットの普及により、情報のデジタル化とネットワーク化が急速に進み、人間の生活様式や文化に大きな影響を与えるようになってきた。数年前までは固定式の電話が普通であり、パソコンを持ち歩く人は限られていた。今では、近くに公衆電話があっても割高な携帯電話で会話をする時代になってきた。2000年5月末現在で、国内の携帯電話の契約数が5000万件を超え、そのうちi-modeやEZWebなどのモバイルサービスの契約数が1000万件を超えたといわれている。携帯電話や携帯端末を持ち歩き、電子メールのチェックをしたり、チケット予約をしている光景は今では珍しくもない。今やモバイル端末花盛りである。近い将来、画像の送受信、ビデオメール、レストランや道路情報のチェック、お金の支払いなど多くの処理がモバイル端末で行える時代になるだろうと予測する人が多い。インターネットを使った情報検索は、モバイル端末が主流になるう。

今やモバイル端末花盛りであるが、実は並行計算¹⁾の世界では、今から10年以上も前に計算環境がコミュニケーションによって動的に変化するというモバイルプロセスの考え方があった^{3), 9)}。ここで、並行計算とは並行プログラムの数学的な計算系（体系）のことであり、1970年代後半から当時エジンバラ大学教授であったRobin Milnerやオックスフォード大学教授であったTony Hoareらを中心に、基礎理論を中心に精力的に研究されてきた分野である。この背景には、当時は並列・並行処理幕開けの時期であり、トランスペーラなような並列計算機への機運が高まったことが挙げられる。

主題のモバイルプロセス計算は並行計算の一種であり、近年のモバイル化の流れを受け最近特に活発に研究が行われている計算系である。

今回の道しるべでは、「モバイルプロセス計算へのいざない」と称して、初学者、この分野の若手研究者、そしてネットワーク関連のソフトウェア技術者を対象に、広義のモバイルプロセス計算に関する研究分野について、教科書、文献、Webページ、国際会議、研究コミュニティ情報など、研究動向をフォローする意味で有益な情報について紹介する。

モバイルプロセス計算とは

モバイルプロセス計算とは、プロセス同士の相互作用により自分も含め周りの動作環境が動的に変化するようなプロセスの計算モデルであり、 π 計算がその代表的な計算モデルである^{2), 8), 9)}。ここで、プロセスとは周りの人や計算機などのエージェントと通信を行うエージェントである。プロセスは、外から見た場合にはまったくのブラックボックスであり、周りの環境が提供する動作を観測することによってのみ解る代物である。この背景には、「プロセスは、その周りの環境との観測可能な相互作用の時間的順序を定めることにより規定できる」とする考え方がある^{1), 6)}。

モバイル技術といえは、人や計算機が物理的に移動しても移動前と同じ計算環境が得られる技術を指す。つまり、携帯端末でのサービスに代表される技術である。しかし、物理的移動による計算環境の変化は、広い意味での広範囲な計算環境の変化であるし、移動するエージェントの振舞いは単なるデータの送受信ではなく、エージェントを送受信の対象としたより高階なコミュニケーションである²⁰⁾。つまり、Web検索ロボッ

トやアプレットの送受信などを対象にした通信モデルがモバイルプロセス計算であり、物理的移動を伴う狭義のモバイルエージェントを含む概念である。

● π 計算

π 計算は、Robin Milner, Joachim Parrow, David Walkerによって1989年に代数的プロセス計算CCS (Calculus of Communicating Systems) の拡張として提案された⁹⁾。CCSについてはRobin Milnerによる教科書⁶⁾が詳しい。また、CCSから π 計算が生まれた経緯や π 計算に潜む哲学的意義については、Milnerによるチューリング賞受賞記念講演が詳しい³⁾。CCSの体系では、独立したプロセスが“hand shake”と呼ばれる同期的1対1通信によって計算が進行する。通信の際、両者を結びつける論理的媒体はリンクと呼ばれ、時として、リンクはポート、チャンネル、ゲートなどとも呼ばれる。値渡しCCS (value passing CCS) では、このリンクを介して送り手から受け手にデータが同期的に送信される。

π 計算では、リンク上を行き交うデータは識別子に相当する名前として抽象化される。この場合の名前は、ポインターあるいはアドレスのようなものである。実は、 π 計算では『名前』の概念が重要な役割を演ずる。つまり、 π 計算の名前には、リンク名、リンク上を送受信されるデータ、そしてパラメータとしての動きがある。名前がこの3つの役割を演ずることにより、従来では困難であったプロセス間のリンク構造やその動的な変化を簡潔に表現することを可能にした。

π 計算における“mobility”は、リンク構造の動的な変化であり、物理的に物が動くという意味での移動性とギャップは大きいのではないかと批判があった。この批判については、Sangiorgiによる高階 π 計算に関する仕事²⁰⁾が完全にその答えを与えてくれた。高階 π 計算では、リンク名や名前などのデータ以外に、プロセスやプロセスの抽象化¹⁰⁾なども通信の対象としている。エージェントの移動をエージェントの送受信として定式化することにより、人や計算機の物理的移動を高階 π 計算の枠組みで完全に記述することができる。理論的に興味ある結果としては、「高階 π 計算から通常の1階の π 計算への変換が可能であること」が挙げられる。この結果により、プロセスの移動を伴う高階なプロセス記述を1階の π 計算の枠組みで行うことが可能であり^{8), 20)}、通常の π 計算の枠組みでも十分な表現能力を有することが示された。

● π 計算の教科書

π 計算の教科書については後で触れることにして、はじめに、 π 計算の前身であるCCS、さらには並行プロセスの計算モデルや並行プロセスの形式化に関する基礎をマスターするうえで重要と思われる教科書を示す。文献6)はMilnerによる並行プロセスの形式化に関する教科書であり、外部観測によるプロセスの概念、通信、観測に基づく等価性、並行計算CCSについて解りやすく説明してある。後述する文献8)が発売されてからは文献6)

は少し陰が薄くなったが、それでも双模倣等価性についてはかなりのページを割いていて、文献8)を読む前にこの教科書を読むことを勧める。CCS以外のプロセス計算として、HoareによるCSP⁴⁾、オランダの研究グループによる代数的モデルACP⁷⁾などが有名である。また、文献5)は、試験と試験等価性に関する代表的な教科書であり、双模倣等価性とは異なる等価性を理解するうえで一読されることを勧める。

次に、 π 計算などのモバイルプロセス計算の代表的な教科書や入門的な論文について触れる。文献8)は、Robin Milnerによる π 計算の教科書であり、前半部ではCCSのような計算環境が変化しない通信プロセスの基礎について詳述している。文献9)は、 π 計算についての最初の論文である。2部構成になっていて、第1部では例を多用しながら名前通信の概念や π 計算の概要を述べている。第2部では、第1部の入門的解説を踏まえて、より形式的な定義と議論を数学的な証明を行いながら π 計算の全体像を説明している。初心者には、第1部をまず勧める。第2部については、適宜参照する程度にとどめるだけでいいかもしれない。

π 計算については、いくつかの入門的解説がある^{10), 11), 13)~15)}。この中で、文献10)は一時に多数のデータの送受信を行える多引数 π 計算のチュートリアルであり、論文中出现してくる“ソート”の概念は、その後活況となる型システムの研究へのトリガーとなった。このほか、非同期通信を基本とする π 計算¹³⁾、 π 計算の応用¹²⁾、関数的プログラミングという観点からの π 計算^{14), 15)}などがおもしろい。以上のほか、 π 計算についてのスライド<URL:<http://www.cl.cam.ac.uk/users/pes20/Teaching/Pi/pictslides1.ps>>や、 π 計算の入門コースに関するWebサイト<URL: <http://www.sics.se/fdt/courses/pi/pi.html>>は、授業の電子教材としても使用できる。

● π 計算の表現能力と興味深いトピックス

名前渡しと名前の静的束縛 — 名前の有効範囲が通信によって受信者を巻き込んで動的に変化すること — によって、 π 計算は万能機械であるTuring機械と同等な表現能力を有する。つまり、原理的にはどんな計算でも π 計算で行うことができる。しかし、計算可能性も重要であるが、コンピューティングパラダイムの観点からは、有用なその他のパラダイムが素直に記述できたり、新たなコンピューティングパラダイムが提供される方がうれしい。この点に関する興味深い結果としては、 π 計算によって基本的なデータ構造や興味深いプログラミングパラダイムが自然に表現できることが挙げられる。数や算術、ブール値やリスト構造などの抽象データタイプが自然に記述でき⁹⁾、 λ 計算やコンビネータ論理などの関数型プログラミングのための計算モデルと密接な関係がある^{9), 14)~16)}。このほか、 π 計算によるオブジェクト指向プログラミングパラダイムの記述¹⁹⁾などが議論されている。

以下は、 π 計算に関する興味深いトピックスと関連

する参考文献である。

- 意味論の違いによるプロセスの振舞い^{(8), (9), (11)} : コミュニケーションにおける名前への代入法の違いによって, early, late, open, hyper などといった操作意味論があり, プロセスの振舞いが微妙に異なる. 意味論の違いは, 次の等価性理論にも影響してくる.
- プロセスの等価性やその完全公理化^{(6), (8), (9), (11), (10)} : 双模倣等価性, 試験等価性, その他の等価性 (合同性や代入を考慮した等価性)
- π 計算における基本演算子の表現能力¹²⁾
- 非同期コミュニケーションモデル¹³⁾
- 真の並列計算モデルとその意味論²⁴⁾
- 様相論理体系とモデルチェック¹⁷⁾
- 型と型システム^{(8), (10), (15)}
- 並行分散型プログラミング言語とツール^{(19), (22) ~ (25)} : π 計算やモバイルプロセス計算を基礎に Pict^{☆1}, Nomadic Pict^{☆2}, Facile^{☆3}, Join^{☆4}, TyCO^{☆5}, JACK^{☆6}, Workbench^{☆7} などのプログラミング言語やツールが設計実装されている.

●モバイルプロセスのバリエーションと応用

モバイルプロセス計算を用いて, モバイル無線通信プロトコルや暗号プロトコル記述への応用がある²¹⁾. また, π 計算を基礎に最近, Action Calculus, Mobile Ambients などの計算モデルや移動エージェントに関する研究がホットになっている.

- Action Calculus : <http://www.cl.cam.ac.uk/users/pes20/actioncalculi.html>
- Mobile Ambients : <http://www.luca.demon.co.uk/Ambit/Ambit.html>
- Mobile Code : <http://www.w3.org/pub/WWW/MobileCode/Overview.html>
- Agent Pages : <http://www.informatik.th-darmstadt.de/~fuenf/work/agenten/pointer.html>
- Mobile Computing : <http://web.yl.is.s.u-tokyo.ac.jp/members/cocoa/agent.html>

オンライン情報源

この分野の研究を進めていくうえで押さえておきたいWebサイト, 国際会議, 研究コミュニティなどの有益な情報源について, 簡単な説明を加えながら紹介する.

● Calculi for Mobile Processes :

<http://www.cs.auc.dk/mobility/>

モバイルプロセス計算のWebサイトである.

<URL: <http://move.to/mobility>> がミラーサイトとなってい

る. π 計算を中心に, モバイルプロセスの計算モデルに関する多くの情報を掲載あるいはリンク集を整備している. 参考文献, 入門用テキスト, 研究者, 研究グループなどの情報が必見である.

● 文献検索システム :

<http://iinwww.ira.uka.de/bibliography/Theory/pi.html>

Uwe Nestmann と Björn Victor による並行計算に関する文献検索システムである. モバイルプロセス計算に少し特化してはいるが, 参考文献を探したりあるテーマに関する一連の文献をチェックする際に便利である. 文献リストは, TeX の bib 形式および dvi 形式でも入手できる.

• bib 形式 : <http://www.cs.auc.dk/mobility/pi.bib.gz>

• dvi 形式 : <http://www.cs.auc.dk/mobility/pi-bib.dvi.gz>

● 研究機関と研究グループ

この分野で活発に研究を行っている研究機関や研究グループ, ならびにそれらのホームページの URL を表-1 に示す.

● 国際プロジェクト, 国際会議, 研究コミュニティ

並行性やモバイル計算に関する国際プロジェクトとして, CONFER, LOMAPS, COORDINATION などがある. CONFER はすでに終了していて, 現在はその続きの CONFER2 のプロジェクトが走っている.

• CONFER-2 :

<http://www.cs.unibo.it/~asperti/CONFER/about.html>

<http://pauillac.inria.fr/~levy/confer/>

• LOMAPS : <http://www.daimi.aau.dk/~bra8130/LOMAPS.html>

並行プロセス計算をはじめ, 並行システムの理論に関する代表的な国際会議として CONCUR (Concurrency Theory) があり, 今年で 11 回目を迎える. 毎年, 8 月下旬にヨーロッパあるいは北米の都市で開催されている. 学会主催の関連する国際会議としては, ACM の POPL (Principles of Programming Languages), IEEE の LICS (Logic in Computer Science) がある. このほかの国際会議として, MFCS (Mathematical Foundations of Computer Science), ICALP (International Colloquium, Automata, Languages and Programming), STACS (Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science), TAPSOFT (Theory and Practice of Software Development), FST-TCS (Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science), CAV (Computer Aided Verification), AMAST (Algebraic Methodology and Software Technology) などがある.

Concurrency と呼ばれる研究コミュニティ (メーリングリスト) があり, 国際会議, サマースクール, テクニカルレポート, 質問, コメントなど並行計算に関する

☆1 <http://www.cis.upenn.edu/~bcpierce/papers/pict/Html/Pict.html>

☆2 <http://www.cl.cam.ac.uk/users/pes20/nomadicpict.html>

☆3 http://www.ecrc.de/research/projects/facile/facile_home.html

☆4 <http://join.inria.fr/>

☆5 <http://www.ncc.up.pt/~llopes/tyco/>

☆6 <http://rep1.iei.pi.cnr.it:80/projects/JACK/>

☆7 <http://www.docu.uu.se/~victor/mwb.html>

研究機関と研究グループ	国	URL
BRICS: Basic Research in Computer Science	Denmark	http://www.brics.dk/
University of Aarhus, DAIMI	Denmark	http://www.daimi.aau.dk/
Uppsala University, DoCSystems	Sweden	http://www.docs.uu.se/
SICS Stockholm, The FDT group	Sweden	http://www.sics.se/fdt/fdt.html
INRIA Rocquencourt	France	http://www.inria.fr/Unites/ROCQUENCOURT-eng.html
INRIA Sophia-Antipolis	France	http://www.inria.fr/Unites/SOPHIA-eng.html
University of Bologna, Dept. of Computer Science	Italy	http://www.cs.unibo.it/
University of Pisa, DoCS, Process Description Languages	Italy	http://www.di.unipi.it/~giangi/pdl.html
University of Firenze, Concurrency and Mobility Group	Italy	http://music.dsi.unifi.it
University of Genova, DISI	Italy	http://www.disi.unige.it/
Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI)	Netherlands	http://www.cwi.nl/cwi/departments/index.html
Eindhoven University of Technology, Formal Methods Group	Netherlands	http://www.win.tue.nl/win/cs/fm/
Leiden University, Theoretical Computer Science	Netherlands	http://www.wi.leidenuniv.nl/CS/TI/
Technical University München, Higher Order and Mobile Systems	Germany	http://www7.in.tum.de/gruppen/theorie/mob/
University of Saarbrücken, DFKI, Programming Systems Lab	Germany	http://www.ps.uni-sb.de/
University of Karlsruhe, Institute for Program Structures and Data Organization	Germany	http://www.ipd.ira.uka.de
University of Berne, Software Composition Group	Switzerland	http://iamwww.unibe.ch/~scg/
University of Edinburgh, CS	UK	http://www.dcs.ed.ac.uk/
University of Cambridge Theory and Semantics of Programming Languages	UK	http://www.cl.cam.ac.uk/Research/TSG/
University of Sussex at Brighton, COGS	UK	http://www.cogs.susx.ac.uk/
University of London, Department of Computing, Theory and Formal Methods	UK	http://theory.doc.ic.ac.uk/
University of St Andrews, Computer Science Division	UK	http://www.dcs.st-and.ac.uk/
Indiana University	USA	http://www.cs.indiana.edu/
Carnegie-Mellon University (CMU), School of Computer Science	USA	http://www.cs.cmu.edu/
Massachusetts Institute of Technology (MIT) Programming Methodology Group	USA	http://clef.lcs.mit.edu/index.html
Yonezawa Lab	Japan	http://web.yl.is.s.u-tokyo.ac.jp/yl/members.html

表-1 モーバイルプロセス計算関連の研究機関と研究グループ

情報を得ることができる。参加方法については、
 <URL: <http://www.cwi.nl/~bertl/concurrency/concurrency.html>>を参照されたし。また、このページでは、過去のメールアドレスも入手できる。

参考文献

【並行計算全般】

- 1) 富樫 敦: チュートリアル「並行プロセスの計算モデル」, 日本ソフトウェア科学会 (1992).
- 2) 吉田展子, 久保 誠, 本田耕平: π -計算とその周辺, 情報処理, Vol.37, No.4, pp.319-326 (Apr. 1996).
- 3) Milner, R.: Elements of Interaction, Communication of ACM (Jan. 1993).

【並行計算の入門書】

- 4) Hoare, C.A.R.: Communicating Sequential Processes, Prentice-Hall (1985).
- 5) Hennessy, M.: Algebraic Theory of Processes, MIT Press (1988).
- 6) Milner, R.: Communication and Concurrency, Prentice-Hall (1989).
- 7) Baeton, J.C.M. and Weijland, W.P.: Process Algebra, Cambridge University Press (1990).

【 π 計算の全般的教科書】

- 8) Milner, R.: Communicating and Mobile Systems: The Pi-Calculus, Cambridge University Press (May 1999).
- 9) Milner, R., Parrow, J. and Walker, D.: A Calculus for Mobile Processes (Parts I/II), Information and Computation, 100, pp.1-7 (1992).
<http://www.cs.auc.dk/mobility/papers/ECS-LFCS-89-85.ps.gz> (Part I)
<http://www.cs.auc.dk/mobility/papers/ECS-LFCS-89-86.ps.gz> (Part II)
- 10) Milner, R.: The Polyadic Pi-Calculus: A Tutorial, in Proc. International Summer School on Logic and Algebra of Specification, Springer Verlag (1992).
<http://www.dcs.ed.ac.uk/lfcsreps/EXPORT/91/ECS-LFCS-91-180/index.html>
- 11) Parrow, J.: An Introduction to the Pi-Calculus, <http://www.it.kth.se/~joachim/intro.ps>
- 12) Sewell, P.: A Brief Introduction to Applied Pi,
<http://www.cl.cam.ac.uk/users/pes20/mathfit-notes.ps>
- 13) Sangiorgi, D.: Asynchronous Process Calculi: The First-Order and Higher-Order Paradigms (Tutorial),
<ftp://ftp-sop.inria.fr/meije/theorie-par/davides/piHOPlasy.ps.gz>
- 14) Sangiorgi, D.: Interpreting Functions as Pi-Calculus Processes: A Tutorial,

- <ftp://ftp-sop.inria.fr/meije/theorie-par/davides/functionPiTutorial.ps.gz>
 15) Pierce, B.: Foundational Calculi for Programming Languages, CRC Handbook of Computer Science and Engineering (1995).
<http://www.cis.upenn.edu/~bcpierce/papers/crchandbook.ps>

【 π 計算の各論】

- 16) Milner, R.: Functions as Processes, Mathematical Structure in Computer Science 2 (2), pp.119-146 (1992).
- 17) Milner, R., Parrow, J. and Walker, D.: Modal Logics for Mobile Processes, Theoretical Computer Science, Vol.114, pp.149-171 (1993).
- 18) Parrow, J. and Sangiorgi, D.: Algebraic Theories for Name-Passing Calculi, Journal of Information and Computation, 120 (2), pp.174-197 (1995).
- 19) Walker, D.: Objects in the Pi-Calculus, Journal of Information and Computation, 116 (2), pp.253-271 (1995).
- 20) Sangiorgi, D.: From Pi-Calculus to Higher-Order Pi-Calculus and Back, Proceedings of TAPSOFT'93, Lecture Notes in Computer Science, Vol.668, pp.151-166, Springer Verlag (1993).

【 π 計算関連のその他の文献】

- 21) Abadi, M. and Gordon, A.D.: A Calculus for Cryptographic Protocols: The Spi Calculus, J. of Information and Computation, 143, pp.1-70 (1999).
- 22) Pierce, B.C. and Turner, D.N.: Pict: A Programming Language Based on the Pi-Calculus, Proof, Language and Interaction: Essays in Honour of Robin Milner, MIT Press (1999).
- 23) Thomsen, B., Leth, L. and Kuo, T.M.: A Facile Tutorial, CONCUR96, pp.278-298 (1996).
- 24) Borgia, R., Degano, P., Priami, C., Leth, L. and Thomsen, B.: Understanding Mobile Agents via a Non Interleaving Semantics for Facile, SAS'96, LNCS 1145, pp.98-112 (1996).
- 25) Fournet, C. and Gonthier, G.: The Reflexive Chemical Abstract Machine and the Join-Calculus, POPL'96, pp.372-385 (1996).

(平成12年7月12日受付)