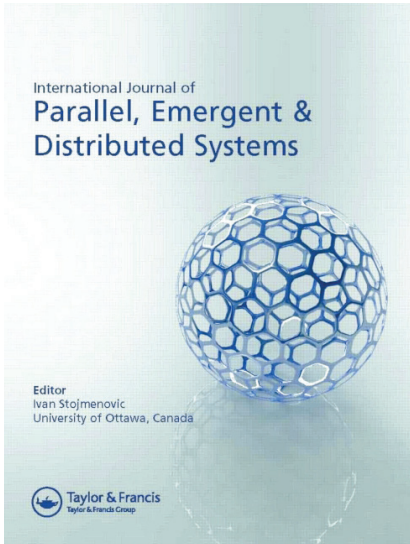


Klasik olmayan hesaplamada yolculuk 1: Hesaplama araştırması için büyük zorluk

International journal of parallel, emergent and distributed systems



Published online: 19 Aug 2006.

Zorluk

Geçiş Durumu[35] karmaşıklık seviyeleri ve çeşitlerinde büyük artış olasılığına yol açan sistem için değişikliktir ve sistemin dinamiklerine tamamen yeni bir uzay fazı açar. Yeryüzünde yaşamın evrimi sırasında geçiş durumları ökaryotların(tek hücreli canlıların), oksijen atmosferinin, çok hücreli canlıların ve bitkilerin zuhur etmelerini içerir. Matematikğin gelişimi sırasında Geçiş Durumları her bir yeni sayı grubunun(negatif, irrasyonel, sanal...) ve Öklit'in paralel postulasının düşüşünü içerir.

-
- * University of York, UK
 - ** University of the West of England, UK
 - *** University of Portsmo <http://explore.tandfonline.com/uploads/images/journals/covers/GPAA.jpg> uth, UK
 - **** University of Kent, UK
 - ***** University of Cambridge, UK
 - ***** University of Exeter, UK

Geçiş Durumu sisteme derin ve temel değişiklikler sağlar; bir kez kanaldan geçince, hayat asla tekrar aynı olmaz. Hesaplama çok önemli bir geçiş durumunun eşliğinde duruyoruz: Bu, mevcut “klasik hesaplama” varsayımlarının etkisinden kurtulmadır. Bilgisayar bilimi için Büyük Zorluk; mevcut klasik hesaplama varsayımlarının bozulmasıyla elde edilen geçiş durumu vasıtasıyla yolculuğa çıkmak ve böylece Klasik Olmayan Hesaplama biliminin olgunlaşmış halini geliştirmektir.

Süreç Amaca Karşı

“Umutla yapılan yolculuk varmaktan daha iyi bir şeydir.”

Robert Louis Stevenson, “El Dorado”, 1878.

Birçok Büyük Zorluklar hedefleri ve bitiş noktaları bakımından hesaplanır: “Bu on yıl bitmeden, hedefe ulaşma, Ay’a bir adamı göndermek ve onu güvenle Dünya’ya geri getirme”[50], insan genomunun haritalanması, $P=NP$ olup olmadığını ispatlama. Biz özel Büyük Zorluğumuzda kullanılacak en iyi metaforun hedef olmadığını ama bunun bir *yolculuk* olduğunu kabul ediyoruz.

Bir yolculuk metaforu bitiş noktasından ziyade tüm sürecin önemini vurgular. 17. ve 18. yüzyıllarda “Seçkin Toplumunun” belirli kesimleri için Büyük Avrupa Gezisine katılma ve ufuklarını genişletmelerine birkaç yıl harcamaları geleneksel hâle gelmişti: Tüm yolculuğun deneyimi önemliydi. Ve Yaşam Yolculuğu’nda, ölüm kesinlikle bir varış noktası değildir! Doğrusu, açık yolculuk, geçiş durumlarını yaşama, sürekli ufkunu genişleterek yeni diyarlar keşfetme bir bitiş noktasına ihtiyaç duymaz.

Binlerce millik bir yolculuk tek bir adımla başlar.

Lao Tzu, Tao Te Ching, Chapter 64, 600 B.C.

Yolculuklar ve hedefler oldukça farklı özelliklere sahiptir. Hedef, sabitlenmiş bir amaçtır ve alınacak rotayı etkiler. Ama açık keşif yolculuğuyla ne olacağını tahmin etmek mümkün değildir: Yolculuğun amacı keşiftir ve yolculuk boyunca keşifler yeni yönler önerir. Başlangıç adımları ve bazı ara yol noktaları tavsiye eder ancak ayrıntılı süreci ve kesin sonucu tavsiye etmez. Keşif yolculuğu ya da birkaç yolculuklar bakımından Klasik Olmayan Hesaplama Zorluğu’nu düşününce biz, amaç için mantıklı görülen yolları öneriyoruz. Ama biz bu erken yol noktalarının geçmişten günümüzü gözlemlediğini vurguluyoruz. Toplumların yolculukları ilerledikçe, yeni yollar görüş alanına girecektir ve bunlarla karşılaşmak için uygun görüldüğü takdirde istikamet değiştirilebilecektir.

Yol hiç bitmez, uzar gider.

J. R. R. Tolkien, The Lord of the Rings, 1954.

Daha Erken İnanmamak için Altı Klasik Paradigma

Klasik hesaplama olağanüstü bir başarı öyküsüdür. Ancak onun, bütün hesaplama olasılıklarının oldukça küçük bir alt kümesini kapsadığına dair büyüyen bir eleştiri vardır.

Hayatın birçok yolunda, gereksiz sınırlamalar oluştururuz. Belki de bunların en haksız olanı,

yaptığımız örtülü varsayımlardır. Bizim “*bu durumda olması gerekiri, bu hep böyle olmuştur*dan” bütünüyle ayırt etmemiz gerekir. Öncekinin örneği olarak düşünülenin, sonrakinin örneği olarak bulunduğu keşifler ortaya çıkabilir. Örneğin, Öklit’in paralel postulatının düşüşü Non-Öklit geometrinin tüm alanlarına yol açtı, büyük olasılıkla da Genel Görelilik yolu için bu bir kaldırım oldu. Klasik hesaplama varsayımlarına karşı benzer karşı çıkımları teşvik etmek istiyoruz. Bu yüzden aşağıda klasik hesaplamaları tanımlıyor gibi görünen birkaç paradigmayı tespit ettik. Ama bu mutlaka tüm hesaplama paradigmaları için doğru olmayabilir. Ne olursa olsun ilginç görülen bu yollardaki paradigmaları düşürmesi, değiştirmesi veya aksi halde karıştırması için toplumu teşvik ediyoruz. Gerçeklik tabanlı yolculuğumuzun broşürü bir başlangıçtır.

Birçok hesaplamalı yaklaşım gerçeklikte ilham arar (özellikle biyoloji ve fizik) veya gerçekliğin özelliklerinden yararlanmaya çalışır. Bu *gerçeklik tabanlı hesaplama* yaklaşımları büyük sözleri savunurlar. Çoğu zaman doğa daha iyi ya da en azından farklı ve ilginç yapar. Gerçek dünyanın kendi hesaplamalı sorunlarını nasıl çözdüğünü inceleme, yeni algoritmalar (örneğin, genetik algoritmalar veya yapay bağışıklık sistemi), bir hesaplamayı neyin oluşturduğunun yeni görüntüsü (örneğin karmaşık adaptif sistemler ve öz-düzenleme şebekeleri) ve yeni hesaplama paradigmaları (kuantum hesaplama gibi) için ilham sağlar.

Klasik hesaplamanın olgunlaşması ile klasik olmayan paradigmaların ortaya çıkışı arasında bir boşluk vardır. Klasik hesaplama açısından entelektüel yatırımlar uzun yıllar boyunca bilim içinde bir el sanatına dönüşmektedir. Yeni gelişen klasik olmayan hesaplama yaklaşımlarını tamamen kullanmak için, onları mümkün olduğunca ve titizlikle mühendislik disiplininde aramamız gerekir. Bilimin ne gibi görüneceği şu an belirsiz ve (bu belirsizlik bizi) Büyük Zorluk keşfe cesaretlendiriyor.

Burada klasik hesaplamanın bazı varsayımlarını ve onları zorlayan farklı alanlardaki araştırmacıların yöntemlerinin ana hatlarını belirledik. Sonraki bölümlerde alternatifleri daha detaylı tartıştık. (Bunların bazıları örtüşüyor.)

Böyle olmak zorunda değildir.

George Gershwin, Porgy and Bess, 1934

Turing Paradigması

Klasik fizik: Enformasyon özgürce kopyalanabilir, enformasyon yereldir, kısıtlıdır; durumlar belirli değerlere sahiptir. *Aksine*, kuantum düzeyinde enformasyon klonlanamaz, dolaşıklık yerel olmamayı ifade eder ve durumlar aynı anda üst üste olabilir.

Atomsallık: Hesaplama zaman ve mekânda ayrıktır; önce ve sonra durumu vardır ve süreç önceden sonraya geçiş yapar. *Aksine*, temel uygulamanın alt katmanları ara fiziksel durumlarını gerçekleştirir.

Sonsuz kaynaklar: Turing makineleri sonsuz kayıt durumu ve sıfır güç tüketimine sahiptir. *Aksine*, kaynaklar her zaman sınırlıdır.

Gerçekleştirme detayı olarak alt katman: Makine fiziksel değil mantıksaldır. *Aksine*, bir formun veya diğerinin fiziksel gerçekleştirilmesi gereklidir ve belirli tercih, sonuçlara sahiptir.

Tümellik iyi bir şey: Dijital bilgisayarın bir ölçütü, algoritmanın bir ölçütü tüm problemlere uyarlanır. *Aksine*, problemle eşleştirilecek uygulamanın seçimi veya hibrid çözümler daha etkili sonuçlar verebilir.

Kapalı ve homojen sistemler: Durum uzayı önceden tespit edilebilir. *Aksine*, hesaplama süreci olumsal bir şekilde yeni uzay durum bölgelerini ortaya çıkarır.

Von Neumann Paradigması

Sıralı program yürütme. *Aksine*, paralel uygulamalar hali hazırda zaten mevcuttur.

Getir-uygula-depola modeli. *Aksine*, diğer mimari yapılar örneğin sinir ağları, FPGA'lar zaten mevcuttur.

Statik program: Program olduğu yerde duruyor ve veri ona geliyor. *Aksine*, veri olduğu yerde kalabilir ve süreç onun etrafında dönebilir.

Çıktı Paradigması

Program bir kara kutudur: O bütün içsel yapılardan soyutlanmış bir kehanettir. *Aksine*, bir işlemin gidişatı -sonuçtan bile-ilginç olabilir.

Program iyi-tanımlanmış tek bir çıkış kanalına sahiptir. *Aksine*, fiziksel bir sistem çalışırken diğer hallerini gözlemlemeyi seçebiliriz.

Program matematiksel bir fonksiyondur: Mantiken denk sistemler ayırt edilemez. *Aksine*, farklı uygulamalardan ve farklı sistemlerden çeşitli çıktılarının korelasyonları dikkati çeker.

Algoritmik Paradigma

Bir program haritası ilk girişten, son çıkışa kadar dış dünyayı ihmal ederek çalışır. *Aksine*, birçok sistem uyarlanabilir süreçlerdir. Değerleri açık tahmin edilemeyen çevreyle etkileşime dayanır. Özdeş girdiler, sistem kendi geçmişini öğrendikçe ve ona adapte oldukça farklı çıktılar sağlayabilir; önceden belirlenmiş bir bitiş noktası yoktur.

Rastlantısallık gürültüdür, kötüdür. Çoğu bilgisayar bilimi belirlemecidir. *Aksine*, rastgelelik veya kaosun önemli olduğu süreçlerden esinlenen doğanın iyi çalıştığı bilinir.

Bilgisayar açılabilir ve kapatılabilir. Bilgisayarların aktif olmasına ihtiyaç duyulmadığının dışında hesaplamalar zamanla sınırlıdır. *Aksine*, bilgisayarlar, kullanıcılar ve diğer bilgisayarlarla sürekli aktif iletişime girebilirler.

Düzeltilme Paradigması

Artan dönüşümsel basamaklar özellemeyi gerçekleştiren bir uygulamaya dönüşür. *Aksine*, bu özelleme ve uygulama arasında bir kesiklilik olabilir, örneğin biyolojik-esinli tanıyıcılar.

İkili sistem iyidir: Cevaplar evet/hayır, doğru/yanlış ve büyük olasılıkla doğru. *Aksine*, olasılıksal, yaklaşık ve bulanık çözümler hem daha kullanışlı hem de daha etkilidir.

Bir özelleme gelişim ve temellerini oluşturmadan önce veya en azından gelişiminden sonra ortaya çıkar. *Aksine*, çevreyle etkileşim geçmişini büyüdükçe özelleme, sistemin gelişen ve değişen bir özelliği olabilir.

Ortaya çıkma, belirme istenmez çünkü özelleme gerekli olan her şeyi ele alır ve düzeltme işlemi tüm detayları göz önünde bulundurmaktır. *Aksine*, sistemin karmaşıklığı büyüdükçe, bu düzeltme paradigması mümkün olmaz ve ortaya çıkan özellikler, istenen davranışların önemli bir mühendislik aracı olur.

Yapay Paradigma olarak bilgisayar

Hesaplama, yapaylar tarafından gerçekleştirilir: Hesaplama gerçek dünyanın bir parçası değildir. *Aksine*, bazı durumlarda doğa “sadece yapar”, örneğin optik Fourier dönüşümleri.

Donanım, hesaplama boyunca değişmeden kalır. *Aksine*, yeni donanım hesaplama devam ettikçe görülür, örneğin yeni kaynakların eklenmesi. Ek olarak donanım “tüketilebilir”, örneğin bir kimyasal bilgisayarın onun başlangıç reaktiflerini tüketmesi. En uç noktada, nanitler hesaplamanın parçası olan bilgisayarı oluşturup, hesaplama sonunda onu tekrar parçalarına ayırıştırır.

Bilgisayar çalışmaya başlatılmalıdır. *Aksine*, son zamanlarda kuantum hesaplama sonuçları [47] destekliyor ki bir sonuç elde etmek için bilgisayara “başla” demene bile ihtiyaç duymazsın!

Şüphesiz neredeyse hiç sorgulamadan kabul ettiğimiz diğer klasik paradigmlar vardır. Onlar da yararlı bir şekilde inkâr edilebilir.

Gerçek Dünya: Turing Paradigmasını Bozma

Kendi bilgisayarı olarak Gerçek Dünya

Evren sadece yapar, hesaplama yapmaya ihtiyaç duymaz. *Hesaba dayalı tutum* ve bakış açısını, fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri hesaplamaymış gibi alabiliriz. En Az Eylem Prensibi kütle ve ışığın en kısa yolunu “hesaplar”; su kendi seviyesini “hesaplar”; evrim dayanıklı organizmalar “hesaplar”; DNA ve morfolojiler fenotipleri “hesaplar”; bağışıklık sistemi antijen tanımayı “hesaplar”. Bu doğal hesaplama, dijital simülasyondan daha etkilidir.

Bilgisayarımız olarak Gerçek Dünya

Hesaba dayalı bakış açısına göre, dünyanın bizim için işlemleri uygulama yolundan faydalanabiliriz. Gerçek Dünya'nın doğal hali bizim kurduğumuz ortamda istenen sonuçları verir.

Gerçek dünyanın sınıflandırma ve araştırmasının çeşitli formları vardır. Örneğin santrifüjler madde karışımlarını ayırıştırmak için *yoğunluk farkından* faydalanırlar. Kaynayan bir karışımın buharı, kaynama noktası düşük olan maddenin bileşenlerince zengindir (ve karışımın geride kalanında ise kaynama noktası yüksek olan maddece zengindir); *termal sınıflandırma* formu oluşturmak için damıtma bundan faydalanır. Kromotografi ayrışmanın kimyasal araçlarını sağlıyor. Ferro-magnetik nesnelere diğer çöplerden endüstriyel güçteki mıknatıslar yardımıyla ayrıştırlmaktadır. Optik Fourier dönüşümlerini belirlemek için kullanılır.

Kurtçuklar ölü eti yeme “işlemini” gerçekleştirir: Tarihsel olarak kurtçuklar yaraları temizlemek için kullanılmıştır, yani bize faydalı olmak için bir bağlamda onların işlemini

gerçekleştirmiştir. Daha yakın zamanda, kirliliğin temizlenmesi “işlemi” gerçekleştirmek için bakterilerin metabolizmaları değiştirildi.

Erişim kontrol hesaplamaları boldur. Döner kilide takılı anahtarın doğru olup olmadığını hesaplamak için uygun olarak oluşturulmuş şekil kullanılır. Fiziksel ortak kilitler güvenlik ve pratik sebepler için birçok sanayi genelinde kullanılır: Örneğin, kurşunsuz benzinli arabanın yakıt tankına, kurşunlu benzin pompasının başlığını yerleştirmek imkânsızdır.

Analog Bilgisayar olarak Gerçek Dünya

Biz gerçek dünyadan daha dolaylı yollardan faydalanıyoruz. “Bilgisayarımız olan Gerçek Dünya'nın” “hesaplamaları” doğrudandır. Sıklıkla biz daha soyut sorularla ilgileniriz. Bazen fiziksel dünya ihtiyacımız olan sonuçları sağlamak için koşum sağlayabilir: Gerçek dünyanın uyguladığı hesaplama ile istediğimiz sonuçlar arasında benzerlik oluşması için ortamı kurabiliriz.

Başa çıkılmaz bir küme içinde en uzun spagetti çubuğunu bulmak için eski bir mekanizma vardır, yerçekimi ve sertlik fiziğinden faydalanma: Spagetti telinin boyu ile faiz miktarı arasında bir analogi kurarak bunu çözmek için kullanabiliriz. Cıva ve alkol termometreler, sıvıların genişmesini hava sıcaklığını hesaplamak için kullanırlar: Analogi sıvının kolon yüksekliği ile sıcaklık arasındadır. Millikan'ın bir elektron üzerindeki yük hesabı düşen petrol damlalarının hızı, havanın viskozitesi, bu damlaların yükü ve çevresindeki elektrik akımının gücünün arasındaki ilişkiden yararlanır.

Klasik hesaplama zaten elektron hareketleri seviyesinde fiziği kullanır. Ama doğayı kullanmanın başka yolları da vardır.

Analog hesaplamanın kendisi diferansiyel denklemlerin analogu olarak elektrik devrelerinin özelliklerinden faydalanır.

DNA hesaplama[4] bazların dizilişlerini problem ve çözüm olarak kodlar ve ipliklerin ayrılması, tekrar oluşmaları ve üremeleri gibi mekanizmaların etkilerinin hesaplanmasından faydalanır. 1020 bazın sırası geniş paralellikle sonuçlanabilir.

Kuantum hesaplama[71], klasik Turing Paradigmasını bozarak bilgisayar bilimlerindeki son yılların en önemli gelişmelerden birini sunmuştur. Adından da anlaşıldığı gibi, kuantum fiziğine dayanmaktadır. Klasik Turing makinesinde *verimli* bir şekilde uygulanamayan hesaplamalara dayanır. Girişim, çoklu dünyalar, dolanıklık ve yerelsizlikten faydalanır. Kuantum hesaplamada araştırma çok hızlı çoğalmaktadır ve halen onun bize sunduğu imkânlardan tam olarak faydalanamıyor oluşumuz aşikârdır. Küçük kuantum bilgisayarları pratik olarak ispatlanmış olsaydı, çeşitli kuantum olaylarının simülasyonları bulunabilirdi. Öte yandan daha büyük bilgisayarlar olasılıkları ispatlarsa, buna hazırlıksız yakalanırız.

- Neden çok az belirgin kuantum algoritmaları var? Yeniler nasıl bulunabilir?
- Verilen bir problemi çözmek için nasıl yeni bir kuantum algoritması nasıl oluşturulur?
- Yeni problemler için var olan kuantum algoritmalarını nasıl kullanabiliriz?

- Kısıtlı hesaplama kaynaklarıyla en iyi algoritmayı nasıl bulabiliriz? Daha genel bir deyişle...
- Kuantum yazılım mühendisliği nasıl olabilir? (Detaylı bilgi daha sonra)
- Hibrit bilişim yaklaşımının bir parçası olarak kuantum bilgisayarlar daha verimli nasıl kullanılabilir?

İlham kaynağı olarak Gerçek Dünya

Bilgisayar bilimindeki birçok teknik, gerçek dünyanın gözlemlenmesinden ortaya çıktı. *Meta-sezgisel arama teknikleri* ilhamını fizik(tavlama simülasyonu), evrim (genetik algoritmalar[36, 68], genetik programlama[7, 53]), nöroloji (yapay sinir ağları [11, 52, 67, 83]), bağışıklık (yapay bağışıklık sistemleri [25]), bitki büyümesi (L-sistemleri [81]), sosyal ağlar (karınca kolonisi optimizasyonu [12]) ve diğer domainler.

Bunların tamamı oldukça başarılı oldu ya da son derece umut verici görünmekte ama onların kullanımını destekleyen bilim, klasik hesaplama bilimiyle yakın eşleşen bir yere varmıyor. Sunulan temel doğa-ilham kaynaklı tekniklerle, etkili ve verimli şekilde probleminden çözümü elde etmek ve sonuçlanan sistemlerin performanslarını anlamak istiyoruz. Fakat bu klasik düzeltme paradigmasının dışında kalmaktadır.

• Klasik olmayan düzeltme bilimi nasıl görünebilirdi? Bir bilim örneğin, bize kritik uygulamalardaki sinir ağlarının davranışlarını tam anlamamız ve kısıtlı kaynakları hedefleyen etkili sistemleri üretmemiz için imkânlar sunar.

Bilgisayarlardaki sanal dünyada, doğanın kuralları tarafından daha fazla zoraki kısıtlanmayacağız. Bizim simülasyonlarımız gerçek dünyanın ötesine kesin bir yolla gidebilir. Örneğin; yeni evrimsel operatörleri gen algoritmalarımıza, yeni çeşit nöronları sinir ağlarımıza tanıtabiliriz. Ve hatta kapsayan kavramları ve karmaşık adaptif sistemlerin kendilerini anlayabiliriz. Gerçek dünya bizim ilham kaynağımızdır, sınırlayıcıımız değil.

- “Gerçekten daha iyi” sistemleri oluşturmak için doğa ilham kaynaklı hesaplamayı nasıl kullanabiliriz?
- Her biri oldukça kısıtlı hafıza ve işlem yeteneğine sahip bileşenlerle yapabileceğin en iyisi nedir?

Büyük Paralellik: Von Neumann Paradigmasını Bozma

Paralel işlem (Hücrel Otomasyon[94], vb.) ve diğer klasik olmayan yapılar sırasal Von Neumann paradigmasını bozmaktadırlar. (Sırasal paradigmanın Von Neuman’dan sonra isimlendirilmiş olma gerçeği, onun kendisinin de bir sırasal hesaplamaları savunan biri olarak algılanması; aslında O da CAs’ın [70] ilk öncülerindedir.)

Klasik paradigma varsayımlar altında, herhangi bir paralel hesaplama serileştirilebilir, ancak paralelliğin avantajları vardır.

Gerçek zaman çevreye müdahale eder. Çevre kendi hızını geliştirir ve basit bir işlemci bu ilerlemeyi sürdüremeyebilir. (Bunun olası uç bir örneği mikroskobik yapay ürünler oluşturmak

için büyük miktarda nonoteknolojik çeviriciler (nanitler)'in kullanımınıdır. Tek bir nanitin büyüklüğe göre dizilişi çok sürebilir.)

Problemin yapısı için hesaplamanın daha iyi eşleşmesi. Gerçek dünya özünde paraleldir ve hesaba dayalı yapının eşleşmesindeki etkilerinin serileştirilmesi zor olabilir. Paralellik aynı zamanda her bir işlemcinin ortak yerleşimine ve en fazla çevreyle etkileşime izin verir. Sonra yazılımın ortak yerleşimine izin verir: Yazılım araçları dağıtık sistemler etrafında ilgili veriyi arar ve diğer araçlarla içerik-bağlantılı şekilde etkileşimde bulunurlar.

Klasik paradigma varsayımları bir kez zorlandığında, bu serileştirmenin mutlaka eşdeğer olmadığını görebiliriz.

Hata toleransı. Hesaplama fiziksel uygulama gerektirir ve bu uygulama hata verebilir. Bazı altkümeler hata verse de paralel uygulamalar çalışmaya devam eder. Sıralı uygulama yalnızca bir işlemciye sahiptir.

Araçlar arasında müdahale/etkileşim. Hesaplama fiziksel uygulamaya gerektirir ve bu uygulamalar enerji tüketimi, elektromanyetik emilim gibi bazı ekstra-mantıklı özelliklere sahiptir. Hesaplamaların kendi kararlarını vermesi ekstra-mantıklı özellik olarak yorumlanabilir (Daha sonra bakınız). Bu özellikler araçlar paralel çalışırken sıralı uygulamada olmayan etkilere yol açarak sistemi etkileyebilir. (Buna olası bir örnek olarak kuantum bilgisayarlarda üst üste paralel kubitler sağlanan katlanarak büyüyen durumlarıdır.)

Büyük paralellığın kullanımı yeni problemleri ortaya çıkarır. Ana problem ise merkezi olmayan Kontrol gereksinimidir. Büyük sayıdaki heterojen araçların hassas kontrollerini uygulayan tek bir merkezi kaynağa sahip olmak pek mümkün değildir. (Bu sadece sistemi serileştirmek için örtülü bir adımdır.) Bu problemin bir kısmı her zaman her yerde hazır sisteme kardeş olan Büyük Zorluk tarafından ele alınır ve bu kısım *açık işlemlerde* sonraki bölümlerde yer alır.

Bakan Kişinin Gözünden: Çıktı Paradigmasını Bozma

Program uygulamasının klasik paradigması soyut hesaplamanın bir çıktı üretmek için bir girdiyi işlediğidir. Bu girdi-çıkıtı eşleşmesi hesaplamanın mantıksal özelliklerinden birisidir ve önemli olan noktalar da şudur: Etkinin hiçbir ara evresi yoktur, hesaplama maddesel farkındalıktan bağımsızdır ve hesaplamanın farklı örnekleri de tam olarak aynı sonuçları ortaya koyar.

Öte yandan hesaplama, bakan kişiye göre değişir. Algoritmalar fiziksel aygıtlar tarafından uygulanır; ara evreler vardır; dünyada fiziksel değişiklikler meydana gelir, farklı cihazlar ayırt edilebilir. Bu fiziksel dünyada gözlemlenebilen her bilgi algılanan hesaplamayı zenginleştirmede kullanılabilir [19].

Mantıksal yörünge gözlemleri

Bir algoritmayı yürütmek mantıksal durum uzayı üzerinde bir yörünge izler. (Uyarı: Bu klasik bir argümandır: Ara *kuantum* hesaplama basamakları gözlemlenememe prensibinde olabilir.) Tipik olarak, bu yörünge gözlemlenmez (olası hata giderme durumları dışında). Bu da kesinlikle ziyankâr bir durumdur: Böyle bir mantıksal bilgi kendi içerisinde hesaplama kaynağı olabilir.

Örneğin, bazı deneysel araştırmalarda yörüngenin izlediği yol araştırmanın final sonucundan çok aranan çözüme dair daha fazla bilgi verebilir.

- Uygulama esnasında yapılan mantıksal gözlemler yararlı bilgi vermede nasıl kullanılır?

Fiziksel yörünge gözlemleri

Bir algoritmayı yürütme dünyadaki fiziksel değişiklikler ile iş birliği içerisinde gerçekleşir. Örneğin; o ilerledikçe yörüngeye-bağımlı gücü tüketir ve bunu tamamlamak için yörüngeye-bağımlı zamanı alabilir. Bu tarz fiziksel kaynak tüketimi hesaplama kaynağı olarak gözlemlenebilir ve kullanılabilir, örneğin, mantıksal yörüngenin özelliklerini ortaya koymada...

(Örneğin, son günlerde akıllı kartlar üzerinde olan ataklar güç tüketim profilini ve içsel işlemlerin veriye dayalı zamanlamasını gizli bilgiyi ortaya çıkarmak için gözlemledi. [17].) Bu tarz fiziksel gözlemler bazı kişiler tarafından sömürülse de daha genel hesaplama kullanımında mevcut olduğu için güçlü bilgi kaynağı oluşturmaktadır.

- Hangi fiziksel gözlemler uygulanabilir ve mantıksal yörüngeler ile ilişkilendirilebilir?
- Bu tarz fiziksel gözlemler için ne tür yeni kullanımlar bulunabilir?

Diferansiyel gözlemler

Bir algoritmanın yürütülmesi fiziksel bir aygıtta algılanır. Fiziksel aygıtlar sıcaklık gibi çevresel faktörlere göre değişebilen fiziksel özelliklere sahiptirler ve *mantıksal* olarak benzer aygıtlardan da ayrılırlar. (Aslında, sayısallaştırmanın mantığı büyük ölçüde bu farklılıkların kaldırılmasından kaynaklanmaktadır.) Bu nedenle kişi tek bir uygulamanın sonucuna göre değil, benzer birkaç uygulama kümesinin çıktılarına göre, birbirinden farklı ama ilişkili sistemlere göre gözlem yapabilir. Örneğin, tekrar edilen bir araştırmanın her uygulaması aranan sonucun elementlerinin %90'ını doğru olarak ortaya koyuyorsa, bu durumda tekrar edilen uygulamalar genel bir çözüm sunmak için bir araya getirilir.

- Çoklu hesaplamaların çeşitliliğinden nasıl faydalanılır?
- Bu çeşitlilik nasıl düzenlenir? Kullanılan programın başkalaşımı ile mi? Çeşitli teknolojik çözüm paradigmasını benimseyerek mi?

Üst-düzyen gözlemler

Bu tarz gözlemler programın uygulamasında olan gözlemler değil programı dizayn etmede kullanılan programın uygulanması esnasında ortaya çıkan gözlemlerdir.

Açık süreçler: Algoritmik paradigmayı bozma

Klasik paradigmada, hesaplamaların son hedefi sabit noktaya ulaşmaktır. Biz bilgisayarı kapatsak da, final çıktısı hesaplamaların "sonucudur". Klasik bilimin çoğunluğu sabit nokta dengesi ve döngelik olgusu üzerine dayanmaktadır (döngelik; sistemin uzamsal ve dönemsel olarak belirlediği bir özelliktir çünkü sistemin herhangi bir basamağı sıfırdan büyük ya da küçük bir olasılıkla tekrardan ortaya çıkacaktır.)

Fiziğin modern teorileri sistemlerin yineleme ve tutarlılıktan yoksun olduğunu

düşünmektedirler: Bu sistemler *denge*nin çok ötesinde ve *homojen değildirler*. Belki de dengeden çok uzakta ve homojen olmayan en belirgin şey hayatın ta kendisi, sürekli gelişim olarak karakterize edilir (değişim.) Beşeri problemlerin birçoğu da şu şekilde en iyi açıklanabilir: Hesaplama bu tarz problemlerin hizmetinde olduğundan, denge fiziğinden uzak olan homojen uygulamalar hesaplamının geleceği ile ilişkilendirilerek düşünülmalıdır.

Zor sistemlerin temelini ele alın: Mantıksal süreç R olarak gösterilir.

$$x_{t+1} = Rx_t(1-x_t)$$

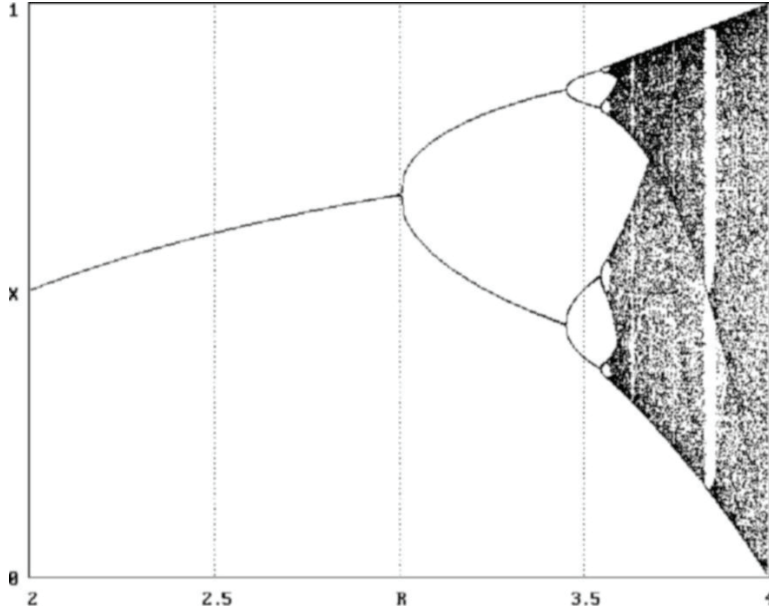
Mantıksal süreçlerin birçoğu şekil 1'de olduğu gibi R fonksiyonu olarak gösterilir. Burada hesaplanacak her nokta birer nokta alıcısıdır.

$1 < R < 3$ değeri için, bu mantıksal süreçlerin sabit bir nokta alıcısı vardır. $R=3$ için ikinci noktadan alıcı vardır. R'yi yükseltirsek, alıcı dördüncü noktaya, sekizinci noktaya gelir. Noktanın ikiye katlanması R'yi arttırdığımız sürece devam eder ve R'nin değerleri her bir katlanma olduğunda birbirine daha da yaklaşır. $R > 3.569945671...$ için mantıksal sürecin çekicisi sınırsız sayıda değer alabilir (bazı gruplar ya da tek sayıların çarpımının çeken sıralaması haricinde). Düzensizden (katlanma olan yer) kaosa (sıradan davranış) doğru faz geçişi vardır. Faz geçiş noktası $R = 3.569945671...$ noktasında kaos sınırları olarak adlandırılır [61].

Devam eden dinamiklerinin lojistik denklemde olduğu bir kesikli süreklilik düşünün. Bu süreçte ölçümler yaptığınızı varsayın. Kabaca ölçümler yapın: $x > 0,5$ ve 0 olduğunda işlem 1'i geçer ya da L baytları uzunluklarını ele alın. Verilen L için, işlemi gösteren bir otomat oluşturun. Bu durumda mantıksal süreçler R'nin birçok değeri ile oluşturulur. Bu da "mantıksal makineler" olarak adlandırılır. Burada açıkça görülüyor ki alanı ki katına çıkarıp kaotik bölgeye geçtikçe bir evre geçişi olacaktır (makine büyüklüğü bayt sıklığının yitimine karşı) [23].

Evre geçişinde makinenin büyüklüğü ve L aralığının uzunluğu karşılaştırıldığında, kendi yönünün dışında genişler. Bu da kaosun sınırındadır. Lojistik makinenin sonsuz bir hafıza kapasitesi vardır. İç hesaplamının seviyesinde lojistik makinenin kaos kenarından geçen bir sıçrayış vardır (Chomsky'nin hiyerarşisinde makine düzenli dil bilgisinden dil bilgisi kurallarının olmadığı farklı bağlamlara doğru geçiş yapmıştır).

Kaos sınırları gereğinden fazla ya da tesadüfi sonuçlar almamak için hesaba dayalı ya da fiziksel yeni kaynaklar ekleyebiliriz. Geleneksel paradigma dahilinde bu durumlar, asla "sonuç" kazandırmayan sınırsız bir çeşitliliğe işaret ettiğinden dışarıda bırakılmaktadır. Ancak günlük hayattaki sistemlerde, eş zamanda aralıksız şekilde devam ettirilen sıralamalar vardır. Burada önceden tahmin edilemeyen bir durumun ortaya çıkması rahatsız edici bir sesin çıkmasından daha iyidir.



Hesaba dayalı bazı yaklaşımlar biyolojik paradigmaları yıkmaya çalışır: Hücresel otomasyon, evrimsel hesaplama, tekrarlayan ağ bağlantıları (otokatalitik, sinirsel, genomik, bağışıklık sistemi, ekolojik ağlar,...), toplu halde yaşayan böcekler, ajan-temelli sistemler, DNA hesaplamaları ve kendilerini üreten nanit sistemler. Buna rağmen, bu durumların çoğunda bu sistemlerin uygulaması kendileri ile sınırlandırılmıştır ve ne durumda nasıl ve ne şekilde bir bilgi olursa olsun oluşumu ortaya çıkarmada yetersiz kalacaktır. Yeni türde kaynakların istenilen her zamanda eklenebileceği açık sistemler düşünmeliyiz.

Yeni kaynak eklemesi harici bir kaynaktan yapılabileceği gibi sistemin kendi aksiyonları tarafından da olabilir. Bu yeni kaynaklar ağ geçidi sağlayabilir ve bunlar da sonunda farklı alanlar açıp yeni olasılıklara izin vererek sistemin karakteristik dinamiklerini değiştirecektir. Hesaplama sistemleri kendilerini açmaya başlamaktalar. Bu yeni açılımlarda örneğin insanların kullanıcı ve makine arasındaki [90] devam eden etkileşimi, sınırsız ağ bağlantıları ve enerji otomasyonu ile çalışan robotik sistemler ile gerçekleşmektedir. Bilgisayarlar her yerde var oldukça, açık sistemlerin fiziğini anlamının önemi daha gerekli bir hal alacaktır. İnsanlardan beklediğimiz çözümler süreç içerisinde gerçekleşecektir ve bu aynı zamanda bizim bilgisayarlardan da olan beklentimizdir.

Geçmiş ile de alakalı olan, tutarlı bir devrimsel zorluk

Klasik fizik modern fizik ortaya çıktığında yok olmadı; aksine onun sınırlılıkları ve uygulanabilir alanları belirgin hale getirildi.

Benzer şekilde, klasik olmayan farklı türdeki hesaplama yöntemleri klasik hesaplamının yerini almayacaktır. Bunun yerine, onu büyütecek ve zenginleştirecektir ve farklı çeşitlerdeki araçlar

sağlandığında her bir iş için en iyisini seçebilir ya da en iyi kombinasyonu oluşturabiliriz. Örneğin, arama uzayı azaltmak için kuantum algoritmasını kullanma ve sonrasında onu keşfetmek için sezgi-üstü kullanma yöntemi tek bir algoritmayı kullanmaktan daha etkin bir yöntemdir.

Klasik ve klasik olmayan öğeleri içeren ve farklı yaklaşım türlerine olanak sağlayan genel ve esnek bir kavramsal yapı oluşturmak çok istediğimiz bir şeydir.

Yolculuk önemli bir şeydir. Yolculuk-aralıklı araştırmalar birçok noktada günlük girişleri artlarında bırakıp daha sonraki zamanlarda geri dönüş yapmak üzere kendi yollarına koyulacaktır. Bilinen bir deyişle bu ara kayıtlar “başarı” olarak değerlendirilebilir. Çeşitli imkânlar bulunmaktadır. Biz yolculuğun alt disiplinler ile ilişkili olmasını ve ayrı bir şekilde de telaffuz edilmesini umuyoruz. Bu konuda birkaç çalışma şimdiye dek yapılmıştır. Bu konuda çalışmanın ikinci bölümünde ele alınmıştır: Klasik Olmayan Hesaplamalarda Yolculuk 2: İlk yolculuklar ve ara noktalar. Aynı zamanda Yaygın Sistemler büyük iddialar da bu konu ile ilişkilendirilebilir. Bu yolculukları birbirlerinden bağımsız keşifler olarak görmemek de önemlidir. Bunun yerine, bunların sonuçları ve iç yüzü daha kapsamlı iddialar için yararlı alt yapı sağlamalıdır ki böylece tüm hesaplama şekilleri ile donanmış olgun bir bilim üretilmiş olunur. Bu da hem klasik hem de klasik olmayan paradigmaları bir araya getirir.

Büyük Zorluk Kriteri

Klasik Olmayan Hesaplama Büyük Mücadele, UK Hesaplama Araştırma Konseyi(UKCRC)'nin isteğine cevaben hazırlanmıştır. UKCRM, Büyük Zorluk'un karşılması gereken birçok kriter ortaya çıkarmıştır. Burada, Zorluk'un bu kriterleri nasıl karşıladığını gösteriyoruz.

Büyük Zorluk, bilimsel disiplininin kaynağı, doğası veya limitleri hakkındaki bilimsel meraktan ortaya çıkmaktadır. Yeni bir biliminin ortaya çıkışındaki amaçları ve klasik paradigma varsayımlarının sorgulanmasından doğmaktadır.

O daha önce görülmemiş bir şeyi inşa etmek için mühendislik hırsına fırsat verir. Yeni bir bilim, mühendislik imkânlarını takip edecek oluşturmayı amaçlar.

Zorluğun ne kadar ne zaman karşılandığı (ya da karşılanmadığı) açık olacaktır. O tamamen karşılanamayacaktır: O ucu açık bir yolculuktur, belirli bir hedefi yoktur. Bilim olgunlaşmaya devam edecektir ta ki kendi oluşturduğu sıradaki paradigma kaymasına kadar.

O, neredeyse tüm araştırma toplumundan ve hatta ondan faydalanacak ya da faydalanmayacaklardan da hevesli desteğe sahiptir. Hayır. Öte yandan, paradigma kaymalarının en iyi kültüründe değişim gerçekleşir.

Önemli bir bilimsel inovasyon nadiren de olsa karşısında olanların dönüştürülmesi ve üzerinde tedrici bir üstünlük kurulmasıyla sağlanır. Saul'un Paul olma ihtimali neredeyse sıfırdır. Gerçekleşen durum ise zıt düşüncelerin yok olması ve başlangıçtaki fikirlere benzer yeni bir jenerasyonun gelişmesidir.

Max Planck, Scientific Autobiography, 1949

O uluslararası bir kapsama sahiptir. Katılım bir ülkenin araştırma profilini artıracaktır. Bu bilgisayar biliminin yeni bir temel alanıdır.

O genel olarak anlaşılabilir ve kamuoyunun hayalini hem de bunun yanında diğer disiplinlerdeki bilim insanların saygısını kazanır. Diğer disiplinlerde (kuantum hesaplama, karmaşıklık, nanoteknoloji...) bilim insanlarınca yazılmış olan daha popüler literatür mevcuttur ve bu yüzden onlar ve kamuoyu tartışmaya açık şekilde CS toplumunun önünde duruyor.

O çok önceden formüle edildi ve halen ayakta durmaktadır. Onun tohumları çok uzun zamandır etrafta ama son zamanlarda belirgin öneme sahip.

O, başlangıçta mümkün olanların ötesine gitmek için vaatlerde bulunuyor ve anlama gelişi gerektirir. Teknik ve araçlar projenin başında bilinmiyor. Zorluk yapısı, bu ölçüte göre önerilen yolculuğu yansıtır.

Tanımlanmış araştırma takımları ve toplumları arasında planlı işbirlikçi olarak adlandırılır. O çeşitli araştırma uzmanlarından desteklere ihtiyaç duyan multi-disiplin Zorluktur.

O kimin kazandığı veya kazanacağı net olan bireylerin ve ekipler arasındaki rekabetten faydalanır ve cesaretlenir. Tek bir “galip gelene” ihtiyaç duyulmaz. Uygulama alanlarının çeşitliliği için çözüm çeşitliliği uygulanabilir olması için teşvik edilmeli. Çeşitli tekniklerin gücü netleştikçe özellikle uygulama alanlarında kazananlar ortaya çıkar.

İlk yolculuklar ve ara noktalar

Klasik Olmayan Hesaplama şemsiyesi altında bir araya getirilebilecek olan birçok tavsiye edilen yolculuğu topladık. Bu yolculuklar bütün zorluklar bağlamı içinde, onu bilgilendiren ve onun tarafından bilgilendirilen, izole olmayan olarak varsayılır.

Güncel olarak tanımlanan yolculuklar;

- Klasik Olmayan Felsefe-Sosyal Duyarlı Hesaplama
- Klasik Olmayan Fizik-Kuantum Yazılım Mühendisliği
- Klasik Olmayan Düzeltme-Yaklaşık Hesaplama
- Lineer Olmayan Medyada Hesaplama-reaksiyon-difüzyon işlemci
- Yapay Bağışıklık Sistemler
- Klasik Olmayan Etkileşim-Açık Dinamik Ağlar
- Klasik Olmayan Mimarlık –Evrimleşen Donanım
- Klasik Olmayan Mimarlık-Moleküler Nano-Teknoloji
- Klasik Olmayan von Mimarlık-Ağ Geçidi Üzerinden Eşzamanlılık

Yukarıda verilen ilk yolculuklar bu makalenin ikinci kısmında genişletilmiştir: *Klasik Olmayan Hesaplama Yolculuk 2: İlk Yolculuklar ve Ara Noktalar.*

Kaynaklar ve ek okumalar

- Editorial article, 2002, *Nature Immunology*, 3(10), 883, October.
- Andrew Adamatzky, 2001, *Computing in Nonlinear Media and Automata Collectives* (IoP).
- Andrew Adamatzky (Ed.), 2002, *Collision-Based Computing* (Springer).
- Adleman, Leonard M. 1994, Molecular computation of solutions to combinatorial problems, *Science*, 266, 1021–1024, November.
- Thomas Back, Fogel, David B., Zbigniew Michalewicz (Eds.), 2000, *Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators* (IoP).
- Per Bak, 1997, *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality* (OUP).
- Wolfgang Banzhaf, Peter Nordin, Keller, Robert E. and Francone, Frank D., 1998, *Genetic Programming, An Introduction: On the Automatic Evolution of Computer Programs and its Applications* (Morgan Kaufmann).
- Albert-Laszlo Barabasi, 2002, *Linked: The New Science of Networks* (Perseus).
- Berry, G. and Boudol, G. 1992, *The chemical abstract machine*, *Theoretical Computer Science*, 96, 217–248.
- Hugues Bersini and Varela, Francisco J., 1991, *Hints for adaptive problem solving gleaned from immune networks*. In: H.P. Schwefel and H. Muhlenbein (Eds.) *Parallel Problem Solving from Nature* (Springer).
- Bishop, Christopher M., 1995, *Neural Networks for Pattern Recognition* (OUP).
- Bonabeau, Eric W. Marco Dorigo and Guy Theraulaz, 1999, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems* (OUP).
- Bradley, Daryl W. and Tyrrell, Andy M., 2000, *Hardware fault tolerance: An immunological approach*. *Proc IEEE Conf on System, Man, and Cybernetics*.
- Brookes, S.D. Hoare, C.A.R. and Roscoe, A.W., 1984, *A theory of communicating sequential processes*, *Journal of the ACM*, 31, 560–699.
- Calude, Cristian S. and Gheorghe Paun, 2001, *Computing with Cells and Atoms* (Taylor & Francis).
- Cardelli, L. and Gordon, A. 2000, *Mobile ambients*, *Theoretical Computer Science*, 240, 177–213.
- Suresh Chari, Jutla, Charanjit S., Rao, Josyula R. and Pankaj Rohatgi, 2003, *Power analysis: Attacks and countermeasures*. In: *Annabelle McIver and Carroll Morgan (Eds.) Programming Methodology* (Springer).
- Bastine Chopard and Michel Droz, 1998, *Cellular Automata Modeling of Physical Systems* (CUP).
- Clark, John A. Susan Stepney and Howard Chivers, 2004, *Breaking the model: Finalisation and A Taxonomy of Security Attacks*, Technical Report YCS-2004-371 (University of York).
- Clarke, E.M., Emerson, E.A. and Sistla, A.P., 1986, Automatic verification of finite-state concurrent systems using temporal logic specifications, *ACM ToPLaS*, 8(2), 244–263.
- Cleaveland, R., Parrow, J. and Steffen, B., 1993, The concurrency workbench: A semantics based tool for the verification of concurrent systems, *ACM ToPLaS*, 15, 36–72.
- Corne, David W., Marco Dorigo, Fred Glover (Eds.), 1999, *New Ideas in Optimization* (McGraw Hill).
- Crutchfield, J.P., 1994, The calculi of emergence: Computation, dynamics, and induction, *Physica D*, 75, 11–54.
- Dipankar Dasgupta (Ed.), 1999, *Artificial Immune Systems and their Applications* (Springer).
- de Castro, Leandro N. and Jonathan Timmis, 2002, *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach* (Springer).

- de Castro, Leandro N. and von Zuben, Fernando J., 2000, An evolutionary immune network for data clustering. SBRN000, Brazil (IEEE), pp. 84–89.
- Marianne Delorme, Jacques Mazoyer (Eds.), 1999, Cellular Automata: A Parallel Model (Kluwer).
- Drexler, K. Eric. 1986, Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology (Doubleday).
- Drexler, K. Eric, 1992, Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation (Wiley).
- Farmer, J. Doyné, Packard, Norman H. and Perelson, Alan S., 1986, The immune system, adaptation, and machine learning, *Physica D*, 22, 187–204.
- Feynman, Richard P. 1982, Simulating physics with computers, *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6/7).
- Floyd, R.W., 1967, Assigning meanings to programs, *Mathematical Aspects of Computer Science, Proceedings Symposium in Applied Mathematics 19*, 19–32, AMS.
- Stephanie Forrest (Ed.), 1991, Emergent Computation: Self-Organizing, Collective, and Cooperative Phenomena in Natural and Computing Networks (MIT Press).
- Stephanie Forrest, Perelson, Alan S., Lawrence Allen and Rajesh Cherukuri, 1994, Self-nonsel self discrimination in a computer. *Symposium on Research in Security and Privacy (IEEE)*, pp. 202–212.
- Murray Gell-Mann, 1994, *The Quark and the Jaguar (Abacus)*.
- Goldberg, David E. 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning (Addison-Wesley)*.
- Gordon, M.J.C. 1987, HOL: A proof generating system for higher-order logic. *VLSI Specification, Verification and Synthesis (Kluwer)*.
- Prabhat Hajela, Jun Sun Yoo. Immune Network Modelling in Design Optimization. In [22]
- Emma Hart, Peter Ross. The Evolution and Analysis of a Potential Antibody Library for Use in Job Shop Scheduling. In [22]
- Hoare, C.A.R., 1971, An axiomatic basis for computer programming, *CACM*, 4(1), 39–45.
- Hoare, C.A.R. 1985, *Communicating Sequential Processes (Prentice Hall)*.
- Holland, John H. 1995, *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity (Addison-Wesley)*.
- Holland, John H. 1998, *Emergence: From Chaos to Order (OUP)*.
- Yoshitero Ishida, 1996, Distributed and autonomous sensing based on immune network. *Proc Artificial Life and Robotics, Beppu (AAAI Press)*.
- Henrik Jeldtoft Jensen, 1998, Self-Organized Criticality: Emergent Complex Behaviour in Physical and Biological Systems (CUP).
- Jerne, Niels K. 1974, Towards a network theory of the immune system, *Annals of Immunology*, 125C, 373–389.
- Richard Jozsa, 1991, Characterising classes of functions computable by quantum parallelism, *Proceedings of the Royal Society of London. A*, 435.
- Kauffman, Stuart A. 1993, *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution (OUP)*.
- Scott Kelso, J.A. 1995, *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior (MIT Press)*.
- Kennedy, John F., 1961, Announcement to the US Congress, 25 May.
- Kephart, Jeffrey O., 1994, A biologically inspired immune system for computers. In: Rodney A. Brooks and Pattie Maes (Eds.) *Artificial Life IV (MIT Press)*.
- Teuvo Kohonen, 1988, *Self-Organization and Associative Memory (Springer)*.
- Koza, John R. 1992, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection (MIT Press)*.

- Koza, John R. 1994, *Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs* (MIT Press).
- Koza, John R. Bennett III, Forrest H. David Andre and Keane, Martin A., 1999, *Genetic Programming III: Darwinian Invention and Problem Solving* (Morgan Kaufmann).
- Kozen, D. 1983, Results on the propositional mu-calculus, *Theoretical Computer Science*, 27, 333–354.
- George Lakoff, 1986, *Women, Fire, and Dangerous Things* (University of Chicago Press).
- George Lakoff and Mark Johnson, 1980, *Metaphors We Live By* (University of Chicago Press).
- Leslie Lamport, 1994, The temporal logic of actions, *ACM ToPLaS*, 16(3), 872–923.
- Landweber, L.F. and Winfree, E. (Eds.), 2002, *Evolution as Computation* (Springer).
- Christopher G. Langton. *Computation at the Edge of Chaos: Phase transitions and emergent computation.*
In [33]
- Langton, Christopher G. (Ed.), 1995, *Artificial Life: An Overview* (MIT Press).
- Mandelbrot, Benoit B. 1977, *The Fractal Geometry of Nature* (Freeman).
- Robin Milner, 1980, *A Calculus of Communicating Systems*, LNCS 92 (Springer).
- Robin Milner, 1999, *Communicating and Mobile Systems: The π -Calculus* (CUP).
- Robin Milner, Parrow, J. and Walker, D. 1992, *A calculus of mobile processes*, *Information and Computation*, 100(1), 1–77.
- Minsky, Marvin L. and Papert, Seymour A. 1988, *Perceptrons* (MIT Press).
- Melanie Mitchell, 1996, *An Introduction to Genetic Algorithms* (MIT Press).
- Mark Neal and Jonathan Timmis, 2003, *Timidity: A useful emotional mechanism for robot control? Informatica: Special Issue on Perception and Emotion Based Reasoning.*
- John von Neumann, 1966, In: A.W. Burks (Ed.) *Theory of Self-Reproducing Automata* (University of Illinois Press).
- Nielsen, Michael A. and Chuang, Isaac L. 2000, *Quantum Computation and Quantum Information* (CUP).
- Mihaela Oprea and Stephanie Forrest, *Simulated evolution of antibody gene libraries under pathogen selection. Systems, Man and Cybernetics* (IEEE).
- Derek Partridge, 1995, *On the difficulty of really considering a radical novelty*, *Minds and Machines*, 5(3), 391–410.
- Derek Partridge, 2000, *Non-programmed computation*, *CACM*, 43, 293–301.
- Derek Partridge, Bailey, T.C. Everson, R.M. Hernandez, A. Krzanowski, W.J., Fieldsend, J.E. and Schetinin, V. 2004, *A Bayesian computer*, <http://www.cs.york.ac.uk/nature/gc7/partridge.pdf>.
- Gheorghe Paun, 2002, *Membrane Computing: An Introduction* (Springer).
- Heinz-Otto Peitgen and Richter, Peter H. 1986, *The Beauty of Fractals: Images of Complex Dynamical Systems* (Springer).
- Petri, C.A. *Kommunikation Mit Automaten*, PhD Thesis, Technical report, Institut für Instrumentelle Mathematik, Bonn.
- Pnueli, A. 1977, *The temporal logic of programs. Proceedings of FOCS (IEEE)*, pp. 46–77.
- Pratt, V.R. 1976, *Semantical considerations on floyd-hoare logic. Proc. 17th Symp. Foundations of Computer Science (IEEE)*, pp. 109–121.
- Przemyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer, 1990, *The Algorithmic Beauty of Plants* (Springer).
- Reynolds, J.C. 1974, *Towards a theory of type structure. Proc. Paris Symposium on Programming*, LNCS 16, (Springer), pp. 408–425.
- Rumelhart, David E. and McClelland, James L. 1986, *Parallel Distributed Processing* (MIT Press).

- Scott, D.S. and Strachey, C. 1971, *Towards a mathematical semantics for computer languages. Proc. Symposia on Computers and Automata, Microwave Research Institute Symposia 21*, pp. 19–46.
- Tanya Sienko, Andrew Adamatzky, Rambidi, Nicholas G. Michael Conrad (Eds.), 2003, *Molecular Computing* (MIT Press).
- Derek J. Smith, Stephanie Forrest, David H. Ackley, Alan S. Perelson. *Modeling the effects of prior infection on vaccine efficacy*. In [24]
- Susan Stepney, 2003, *Critical critical systems. Formal Aspects of Security, FASEC002, LNCS 2629* (Springer).
- Tommaso Toffoli and Margolus, Norman H. 1985, *Cellular Automata Machines* (MIT Press).
- Watts, Duncan J. 1999, *Small Worlds: The Dynamics of Networks Between Order and Randomness* (Princeton University Press).
- Peter Wegner, 1997, *Why interaction is more powerful than algorithms, CACM*, 40(5).
- Welch, P.H. et al. 2004, *Concurrency Research Group*, www.cs.kent.ac.uk/research/groups/crg/.
- Wittgenstein, L. 1921, *Tractatus Logico-Philosophicus*.
- Wittgenstein, L. 1953, *Philosophical Investigations* (Blackwells).
- Stephen Wolfram, 1994, *Cellular Automata and Complexity: Collected Papers* (Addison-Wesley).
- Andrew Wuensche and Mike Lesser, 1992, *The Global Dynamics of Cellular Automata* (Addison-Wesley).

