

Poglavje 1

Motivi za iskanje procesne platforme bodočnosti

Temeljna pojma pričujočega dela sta pojma *procesne metode* in *procesne platforme*. Pod slednjo smatramo kakršenkoli medij, s katerim je mogoče upravljati *nadzorovano* in je zmožen *pomnjenja, odločanja* (procesiranja) in *prenosa podatkov*, pod mojim procesne metode pa koncept procesiranja nad podatki. Do sedaj smo bili v računalništvu vajeni procesnih platform, ki so temeljile na elektronskih osnovah, ter procesnih metod, ki so temeljile na dvostanjskem in s tem posledično dvovrednostnem konceptu obravnave nosilcev podatkov.

Z vidika načina uporabe računalniških sistemov smo na prehodu med dvema dobama. V zadnjih tridesetih letih smo živeli v dobi *namiznega računalništva* (angl. *desktop computing*). Tako smo imeli procesno moč skoncentrirano na enem mestu, njena cena (npr. osebnega računalnika) pa se skozi čas ni drastično spreminjala. Za isto ceno smo tako kupovali sisteme, katerih zmogljivosti so se skozi čas zviševale, česar smo vajeni pri vseh širokopotrošnih produktih (npr. osebnih vozilih). Nova doba, v katero vstopamo, je doba *vseprisotnega računalništva* (angl. *pervasive, ubiquitous human centered computing*). Zanj je značilna razpršenost procesnih platform tako v našem delovnem, kot tudi privatnem življenjskem okolju. S tem se porajajo dileme o bodočnosti procesne platforme. Slednjo tematiko želimo predstaviti v pričujočem delu predvsem z vidika možnosti realizacije pomnjenja, odločanja in prenosa podatkov v nekonvencionalnih - alternativnih medijih in na nekonvencionalne načine.

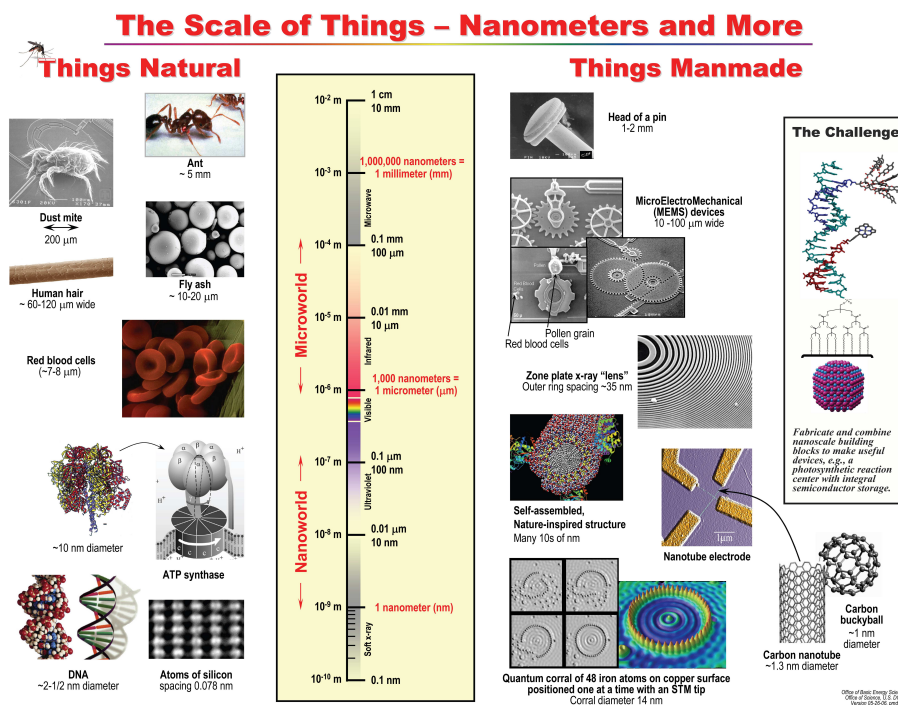
1.1 Nanotehnologije in nanoračunalništvo

Področje *nanotehnologij* lahko jedrnato opišemo kot nadzorovano manipuliranje z delci ali entitetami velikostnega reda nanometra ($10^{-9}m$, *nm*). V omenjenem velikostnem redu se nahajajo elektroni, atomi, molekule, molekule DNA itd. Glede na naravo osnovnih entitet je področje v teoretičnem smislu zanimivo fizikom, kemikom, elektrotehnikom in biologom, v aplikativnem smislu pa me-

dicincem, računalničarjem, genetikom, farmacevtom, strojnikom, gradbenikom itd. V današnjem času je področje nanotehnologij v vidnem porastu predvsem zaradi dveh aktivnih segmentov raziskav:

- *tehnološki segment* se ubada predvsem z analizo možnosti izdelave materialov bodočnosti; slednji naj bi imeli željene lastnosti v smislu trdnosti, prevodnosti, teže, viskoznosti, vodoodpornosti itd.;
- *procesni segment* se ubada z analizo možnosti implementacije nadzorljivih dinamičnih procesov v nanomaterialih; slednje sodi predvsem v domene medicine, farmacije in računalništva;

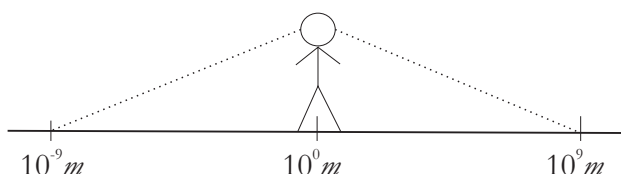
V pričujočem delu se bomo usmerili predvsem na slednjo kategorijo. Namesto pojma nanotehnologij bomo tako uporabili ožji pojem *nanoračunalništva* (angl. *nanocomputing*), cilj tega področja pa je iskanje *procesne platforme bodočnosti*. Na sliki 1.1 je predstavljena primerjava velikostnih redov nekaj nam znanih objektov iz realnega sveta, da bi si lažje ustvarili predstavo o možnostih za nove rešitve, ki nam jih ponuja svet nanodimenzij (*nanosvet*).



Slika 1.1: Primerjava različnih velikostnih razredov nam znanih objektov (slika je povzeta po viru [1]).

Na sliki 1.2 je predstavljena shema *vidljivosti, aktivnega obvladovanja* ali

oprijemljive percepcije človeške civilizacije [2] z vidika današnjega časa. V centru koordinatnega sistema je objekt - človek, čigar rang velikosti je opredeljen z velikostnim razredom $10^0 m$. Zorni kot njegovega aktivnega obvladovanja prostora je pogojen v obe smeri z odmikom devetih velikostnih razredov. Na levi strani slike se človek tako sooča in skuša obvladovati dimenzijo materialov velikostnega ranga enega nanometra (nm , $10^{-9} m$) in nanotehnologij, na desni strani slike pa človek skuša posegati tudi po bolj oddaljenih dimenzijah v prostoru, kot so npr. naš satelit Mesec, ki je od našega planeta oddaljen 384.000 km (velikostni rang $10^9 m$) in planet Mars, ki je v povprečju enega leta oddaljen od zemlje 225 milijonov km (velikostni rang $10^{12} m$).



Slika 1.2: Grafična predstavitev dimenzije aktivnega obvladovanja naše civilizacije v prostoru (slika je povzeta po viru [2]).

Ena od možnih spekulativnih hipotez je, da je predpogoj za širjenje razdalje obvladovanja človeka v grafu proti desni istočasno hkratno širjenje razdalje obvladovanja proti levi. Zgodovinsko lahko omenjeno hipotezo ponazorimo z zgleodom začetka migriranja ljudstev na večje razdalje v srednjem veku. S potovanjem na večje razdalje je človek prihajal v okolja, v katerih so nanj prežale še nepoznane nevarnosti v obliki različnih nalezljivih bolezni. Da bi človek takšna področja lahko uspešno osvajal in v njih preživel (povečal je razdaljo na grafu na sliki 1.2 proti desni), je moral osvojiti tudi poznavanje vzrokov bolezni (npr. virusov), s čimer je povečal razdaljo na grafu na sliki 1.2 proti levi.

V naslednjih razdelkih pričujočega poglavja bomo našli nekaj osnovnih konceptov in izhodišč, za katere smatramo, da pospešeno vodijo k prehodu na *nano* pristope tudi na področju računalništva.

1.2 Mooreov zakon

Na področju računalništva je od sredine sedemdesetih let pa vse do današnjega časa v veljavi zakon Gordona Moorea, ki glede na hitrost razvoja mikro elektronike napoveduje podvojevanje kompleksnosti integriranih vezij približno vsaki 2 leti [3], [4]. Prvotna inačica zakona iz leta 1975 je eksplicitno napovedala podvojevanje števila tranzistorjev v integriranih vezjih na vsakih 18 mesecev.

Mooreov zakon temelji na miniaturizaciji tranzistorjev, kot osnovnih gradnikov integriranih vezij. Omenjena miniaturizacija omogoča sledeče prednosti:

- tranzistorji in s tem posledično integrirana vezja delujejo hitreje;

- poraba energije na posamezni tranzistor je posledično manjša;
- glede na manjše velikosti tranzistorjev lahko dosežemo vse večjo gostoto integriranih vezij;

Od nastanka zakona pa vse do današnjih dni je razvoj integriranih vezij potekal v zaporedju dveh izmenjujočih se faz. Ti fazi sta [3]

- *scaling up* faza, v kateri pride do povečevanja števila tranzistorjev v integriranih vezjih in
- *scaling down* faza, v kateri pride do zmanjševanja velikosti tranzistorjev.

V današnjem času sta v razvoju integriranih vezij prisotni obe fazi ob dominanci faze *scaling down*.

Rast, ki jo napoveduje omenjeni zakon za področje integriranih vezij, predstavlja posebnost na vseh področjih razvoja, saj nobeno področje ne dosega tako hitre, praktično eksponentne rasti. Za primerjavo povzemimo rast pridelave hrane v razvitem svetu. Na tem področju velja zakon o 2% zviševanju količine pridelane hrane letno na posameznega pridelovalca, pri čemer zakon velja že vse od začetka petdesetih let prejšnjega stoletja [3].

Veljavnost Moorevega zakona je pripeljala do dejstva, da je bilo v celotnem letu 2014 v integrirana vezja vgrajenih $250 \cdot 10^{18}$ tranzistorjev, ali toliko, kot jih je bilo v celotni zgodovini elektronske industrije vgrajenih vse do vključno leta 2010. V cenovnem smislu je cena na vgrajeni tranzistor od l.1965 do današnjega dne (o.p. do l.2015) padla iz 30 USD na 10^{-19} USD [3].

Gordon Moore (danes filantrop živeč na Havajih) v svojem intervjuju iz leta 2015 [3] izpostavi dve ključni omejitvi pri nadaljnjem razvoju integriranih vezij kot osnovnih gradnikov procesiranja in s tem posredno tudi grožnji pri nadaljnji veljavnosti Moorevega zakona. Prva je *hitrost svetlobe*, ki jo v nobenem primeru ne moremo v domeni procesiranja preseči, druga pa *problem obvladovanja nano entitet* kot so npr. atomi, kjer se soočimo s kvantnimi efekti, za katere še ni znano, kako se jim izogniti, ali pa jih koristno uporabiti v domeni procesiranja.

Mooreov zakon je v praksi veljal vse do današnjih dni. Če bo veljal tudi v bližnji prihodnosti, bo z miniaturizacijo *nano nivo* velikosti tranzistorjev dosežen v približno 10 letih. Glede na že obstoječo kompleksnost tehnologij litografije, ki bodo miniaturizaciji težko sledile, se danes vršijo raziskave na različnih področjih, ki bi lahko zadovoljevala nivo željene nano granulacije in obvladljivost materialnih entitet, ki bi nadomestile tranzistor v polprevodniški izvedbi. Kot smo našli že v uvodu, so v centru opazovanja elektroni, atomi in molekule, z njimi pa se ukvarjajo različne vede (npr. fizika, kemija, farmacija, elektrotehnika itd.).

1.3 Analitični in sintezni pristop

Eno od osnovnih vodil področja nanotehnologij je prehod iz *analitičnega* (angl. *top down*) na *sintezni* (angl. *bottom up*) koncept zasnove izgradnje poljubnega sistema [5].

Analitični koncept naša civilizacija uporablja že vse od svojega začetka, ki ga označuje pojav rabe *orodja* [6] za doseganje človeških ciljev. Za to obdobje je tipično, da temelji na obdelavi naravnih virov do željenih oblik, velikosti in lastnosti. Tipični primeri so obdelave lesa in rudnin, proizvodnja zlitin in kemikalij, vse do metod elektronske litografije, ki predstavlja temelj izdelave današnjih elektronskih integriranih vezij. Osnovni princip proizvodnje je v preteklosti torej temeljil na *obdelavi materialov*, ki v svoji zasnovi vodi tudi do ostankov materiala (izmeta) in odpadkov.

Sintezni koncept temelji na obstoju množice *osnovnih entitet* (npr. molekul, atomov, elektronov itd.), ki jih sestavljamo (sintetiziramo) v poljubne zaključene enote (sisteme, produkte itd.). Za ta koncept je pomembna narava izhodiščne entitete, pred iskanje katere je postavljena današnja civilizacija.

Na smiselnost prehoda iz analitičnega na sintezni princip nas opozarja tudi zgled načina uporabe LEGO kock, s katerimi se radi igrajo otroci. Večini slednjih ne pade na pamet, da bi kocke razbijali s kladivom in preoblikovali, temveč stremijo le k lažji rešitvi, kako iz razpoložljivih kock sestaviti željene objekte. Postopni prehod na sintezni koncept nenazadnje dokazuje pojav in hitra širitev uporabe 3-D tiskalnikov.

1.4 Željene lastnosti procesne platforme bodočnosti

Glede na to, da smo pristali na termin nanoračunalništva, ki raziskuje alternativne platforme procesiranja bodočnosti, naštejmo tudi osnovne lastnosti, ki se od takšne platforme pričakujejo:

- *energetska varčnost*: glede na vse večjo porabo energije, s katero se sooča človeštvo, je ena od osnovnih željenih lastnosti bodoče procesne platforme njena čim manjša poraba energije; slednje cilj sledi tudi iz tega, ker se civilizacija vse bolj obkroža s procesnimi platformami in pravi "bum" vseprisotnosti miniaturnih procesnih naprav šele prihaja; istočasno je v okviru energije smiselno razmišljati o platformah, ki bi primarno energijo zajemale iz obnovljivih virov;
- *zanesljivost delovanja*: počasna vpeljava 4-bitnega mikroprocesorja v začetku sedemdesetih let prejšnjega stoletja nas opozarja na to, da bo morala procesna platforma bodočnosti delovati vsaj tako zanesljivo, kot že obstoječi elektronski računalniki; le v tem primeru bo potrošnja potrdila ekonomsko upravičenost razvoja platforme;
- *možnost nadzora nad delovanjem*: glede na različne smeri raziskav možnih implementacij procesne platforme bodočnosti, se nakazujejo tudi energetsko samozadostne rešitve (npr. procesiranje v fluidih [7]), ki prinašajo nevarnost nezmožnosti obvladovanja procesiranja ob vse večji koncentraciji metod učenja in s tem kopičenja umetne inteligence; omenjeno situacijo lepo prikaže Stanley Kubrick v filmu Vesoljska odiseja 2001 [6], v katerem

se človeška civilizacija začne z odkritjem orodja in konča, ko se orodje upre proti njej - ko človek postane orodje;

- *možnost pospeševanja delovanja*: kakršenkoli prehod na novo platformo mora izpolnjevati tudi pogoj možnosti naknadnega povečevanja procesne hitrosti, tako kot smo bili temu priče v preteklosti na področju elektronskih integriranih vezij;
- *možnost neposrednega prehoda na dvostanjsko procesiranje z opcijo naknadne vpeljave večstanjskega procesiranja*: za obstoječo strojno in programsko računalniško industrijo je pomembno, da so vse današnje logične rešitve neposredno prenosljive na novo platformo procesiranja; seveda pa je pomembna tudi možnost naknadne reorganizacije pojmovanja logike, ki bi pripeljala do razširjave koncepta procesiranja preko večstanjske do zvezne logike; dokaz o smislu vpeljave večstanjske logike se nam ponuja v delu [8], pa tudi konkretne realizacije računalniških sistemov (npr. serija ruskih računalnikov SETUN) so pokazale obilico prednosti pred sistemi temelječimi na binarni dvostanjski logiki;
- *cena*: platforma mora biti ob prehodu nanjo cenovno sprejemljiva, v prihodnosti pa mora njena cena postati drastično nižja od cen današnjih platform, zaradi njene množične uporabe;
- *možnost razgradnje ali ponovne uporabe*: platforma bodočnosti bo morala biti izdelana iz materialov, ki jih bo možno popolnoma razgraditi (temu danes ni tako) in materiale ponovno uporabiti; slednjo značilnost nenazadnje prinaša vse bolj popularen trend *krožnega gospodarstva*, ki si za osnovni cilj postavlja tendenco čimdaljšega zadrževanja materialnih virov v proizvodno - potrošnem ciklu; nenazadnje si ne smemo zatiskati oči tudi pred dejstvom, da so razvite države v zadnjih desetletjih svoje elektronske odpadke izvažale v reciklažo v nerazvite države (Malezijo, Kitajsko itd.), slednje pa so to svojo storitev v zadnjih letih začele odklanjati, tudi zaradi tega, ker se materiali na teh lokacijah v resnici niso reciklirali, ampak kopičili kot odpadki;

Kot vidimo, so si nekatere željene lastnosti z zornega kota današnjega časa kontradiktorne, čas in razvoj pa bosta pokazala, katere od njih so pomembnejše in ali so vse dosegljive istočasno.

1.5 Energetski vidik uporabe računalniških sistemov

V septembru leta 2019 je bila v dnevnem časopisju objavljena novica¹, da naj bi bila ocenjena vrednost porabe električne energije za potrebe spletnega rudarjenja kriptovalut na svetovnem nivoju v letu 2018 približno takšna, kot je

¹<https://www.delo.si/novice/okolje/za-spletno-rudarjenje-toliko-elektrike-kot-je-porabi-poljska-228819.html>

bila celotna poraba električne energije na Poljskem v istem letu, pri čemer ima Poljska 38 milijonov državljanov. Ocenjena vrednost porabe v letu 2018 naj bi bila 18,8 gigavatov (GW) električne energije, kar naj bi posledično povzročilo 800 ton emisij ogljikovega dioksida v naravno okolje v tem letu. Na tem mestu se ne bomo spuščali v konsistentnost omenjene novice (Poljska naj bi po drugem viru² že v l.2008 porabila 132.000 GWh/leto), a dejstvo je, da poraba električne energije s strani računalniških naprav v razvitem svetu hitro narašča. Slednje velja tako za pravne subjekte (podjetja, državne ustanove itd.), kot tudi za gospodinjstva.

Z vidika potrošnje električne energije s strani končnih porabnikov ali gospodinjstev, je zanimivo navajanje revije Monitor iz leta 2014³, ki ocenjuje, da je rast porabe električne energije v gospodinjstvih razvitega sveta približno 2%. Pri tem vir navaja konkretno oceno razdelitve porabe električne energije v gospodinjstvih po deležih glede na namene električnih naprav. Le ta je sledeča:

- približno $\frac{1}{3}$ porabe gre za ogrevanje;
- približno $\frac{1}{4}$ porabe gre za pripravo in hrambo hrane;
- približno $\frac{1}{10}$ porabe gre za čiščenje;
- približno $\frac{1}{10}$ porabe gre za TV in računalniške naprave (mobilni telefoni, prenosniki, osebni računalniki itd.);
- približno $\frac{1}{12}$ porabe gre za razsvetljavo;
- približno $\frac{1}{6}$ porabe gre za naprave drugih namenov;

Navkljub temu, da je ocena deleža porabe računalniških naprav v gospodinjstvih relativno majhna, naj bi po pisanju vira 2% letna rast porabe na nivoju posameznega gospodinjstva izhajala predvsem iz tendence opremljanja našega bivanjskega okolja z vse večjim številom manjših računalniških sistemov. Če sami količini porabljene energije prištejemo še njene ekološke posledice, kot so npr. izpusti toplogrednih plinov ali regulacije rek, je hitra rast števila računalniških sistemov v našem okolju vsekakor dejavnik, ki bo v prihodnosti podvržen tendenci zaustavljanja rasti iz ekoloških razlogov.

1.6 Zgodovinske iztočnice razvoja nanoračunalništva

Arhitekturno gledano računalniški sistemi od svojih začetkov do danes slonijo na Von Neumannovem modelu. Slednji sloni na ločenosti pomnilnika in procesne enote, kar vodi do velike količine prenešenih podatkov in programskih ukazov med njima. Ker se zmogljivost prenosa v primerjavi z rastjo velikosti pomnilnika

²https://sl.wikipedia.org/wiki/Seznam_držav_po_porabi_in_proizvodnji_električne_energije

³<https://www.monitor.si/clanek/najbolj-brano-v-letu-2018-2020-koliko-energije-porabijo-nase-naprave/157885/>

in hitrosti procesne enote ne dviguje premo sorazmerno, nastaja na točki prenosa ozko grlo. V nadaljevanju bomo našeli nekaj zgodovinskih osebnosti, ki so tako ali drugače pomembne za razvoj nanoračunalništva:

- *John Von Neumann* (matematik, 1903 - 1957) je temelje predhodno omenjene računalniške arhitekture postavil v štiridesetih letih prejšnjega stoletja. Že sam se je neustreznosti arhitekture zavedal in do smrti iskal druge možnosti arhitekturne izvedbe predvsem v smeri paralelnega procesiranja [9].
- *Richard Feynman* (fizik in Nobelov nagrajenec, 1918 - 1988) je prehod na nanonivo napovedal v svojem znamenitem govoru l.1959 [10], ko je izjavil, da se za prihodnost smisla znanosti ne gre bati, ker ”...**je tam spodaj še veliko prostora...**”. Feynman je v svojem govoru izpostavil možnosti stalne miniaturizacije na osnovi obvladovanja nekkih osnovnih entitet nano velikostnega reda.
- *Alan Turing* (matematik in računalničar, 1912 - 1954) je temelje osnov računalništva postavil predvsem s teoretičnim modelom Turingovega stroja, bil pa je tudi Von Neumanov tesen sodelavec.
- *Eric Drexler* (nanoteoretik, 1955) je zaslužen predvsem za obujanje idej predhodno naštetih znanstvenikov in njihovo umeščanje na področje molekularnih nanotehnologij. Znan je njegov govor v ameriškem kongresu l.1992 [11], s katerim je takratno ameriško politiko želel seznaniti s prednostmi, slabostmi in nevarnostmi obvladovanja nano nivoja. Od omenjenega leta ameriška vlada vlaga velike vsote denarja v razvoj nanotehnologij na vseh mogočih aplikacijskih področjih.

1.7 Aktualne nekonvencionalne računalniške platforme

Predhodni termin nanoračunalništva delno sovpada s terminom *nekonvencionalnega procesiranja* (angl. *unconventional computing*). Ker so nanoračunalniški koncepti v fazi razvoja, se smatrajo kot nekonvencionalni in odtod prepletanje pomena obeh izrazov, pri čemer se moramo zavedati, da nanoračunalništvo predstavlja le del konceptov, s katerimi se ukvarja področje nekonvencionalnega procesiranja. Glede na trenutno aktualne raziskave lahko razdelimo področje nekonvencionalnega procesiranja na dve osnovni skupini in sicer na *platformno odvisne* in *platformno neodvisne* pristope. Mejo med obema skupinama je v določenih primerih težko določiti.

Trenutno aktualne platformno odvisne nekonvencionalne metode procesiranja so sledeče:

- kvantni celularni avtomati (angl. *quantum dot - cellular automata* - QCA),

- mikro/nano elektro mehanski sistemi (angl. *micro/nano electronic mechanical systems* - MEMS/NEMS),
- DNA procesiranje (angl. *DNA computing*),
- optično procesiranje (angl. *optical computing*),
- reakcijsko difuzijsko procesiranje (angl. *reaction-diffusion computing*) itd.

Trenutno aktualne platformno neodvisne nekonvencionalne metode procesiranja so sledeče:

- kvantno procesiranje (angl. *quantum computing*),
- amorfno procesiranje (angl. *amorphous computing*),
- reverzibilno procesiranje (angl. *reversible computing*),
- večstanjsko procesiranje (angl. *multi state computing*),
- analogno procesiranje (angl. *analogous computing*),
- naravno procesiranje (angl. *natural computing*) itd.

Navkljub temu, da v angleških terminih nastopa beseda "computing", smo se za prevode v termin "procesiranje" odločili, ker je našemu delu, ki se ukvarja z osnovnimi logičnimi principi računalniškega delovanja, bližji.

1.8 Smernice vizije nanoračunalništva

Nanotehnologije so na aplikacijskem nivoju z različnimi področji raziskav v ospredje potisnile kar nekaj novih, na prvi pogled kar futurističnih pojmov, pa tudi nekatere že znane, a do sedaj v računalništvu po krivici zapostavljene. Naj jih naštejemo le nekaj [5]:

- *samoreplikacija* (angl. *self replication*) predvideva zmožnost samodejne replikacije osnovnih entitet sistema; takšnemu postopku smo v naravi priča pri delitvi celic;
- *samoreprodukcija* (angl. *self reproduction*) predvideva zmožnost reprodukcije osnovnih entitet; takšnemu postopku smo v naravi priča pri razmnoževanju živih organizmov;
- *samoorganizacija* (angl. *self organisation*) predvideva zmožnost entitet, da se organizirajo po nekem vnaprej določenem pravilu ali algoritmu;
- *sinteza entitet* (angl. *bottom up concept*) predvideva izgradnjo sistemov, produktov itd. na osnovi algoritmično vodenega nadzora;

- *molekularno sestavljanje* (angl. *molecular manufacturing*) predvideva izgradnjo surovin in produktov na osnovi molekul in algoritmično vodenega nadzora;
- *molekularni popravki* (angl. *molecular repairing*) predvidevajo popravke dednih in okvarjenih bioloških materialov.

1.9 Povzetek poglavja

Temeljni namen pričujočega dela je usmerjanje pozornosti na potencialne alternativne platforme in metode procesiranja bodočnosti. Slednje naj bi vodile v danes nam težko predstavljivo novo „industrijsko“ revolucijo, ki bo po vsej verjetnosti močno preoblikovala ne samo gospodarsko srenjo, temveč tudi sociološke in politične temelje naše civilizacije. V naslednjih poglavjih predstavimo osnove večine aktualnih nekonvencionalnih metod in platform procesiranja, pri nekaterih od njih pa predstavimo tudi svoje najnovejše znanstvene izsledke, nastale na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani.

Literatura

- [1] “The scale of things.” <http://science.energy.gov/bes/community-resources/scale-of-things-chart/>, September 2016.
- [2] M. Hak, *The MEMS Handbook*. CRC Press, 2002.
- [3] M. Mack, “The multiple lives of Moore’s law,” *IEEE Spectrum*, vol. 4, pp. 29–35, 2015.
- [4] D. Kodek, *Arhitektura in organizacija računalniških sistemov*. Bi-Tim, Slovenija, 2008.
- [5] *From editors of Scientific American: Understanding nanotechnology*. Warner Books, ZDA, 2002.
- [6] “2001: A Space Odyssey,” 1968.
- [7] A. Adamatzky, B. Costello, and T. Asai, *Reaction diffusion computers*. Elsevier, 2005.
- [8] B. Hayes, “Third base,” *American Scientist*, vol. 89, no. 6, 2001.
- [9] W. Aspray, *John Von Neumann and The Origins Of Modern Computing*. The MIT Press, England, 1990.
- [10] “There’s Plenty of Room at the Bottom.” https://en.wikipedia.org/wiki/There%27s_Plenty_of_Room_at_the_Bottom/, September 2016.
- [11] E. Regis, *Nano – the emerging science of nanotechnology*. BackBay Books, 1995.