

Modular Robotics

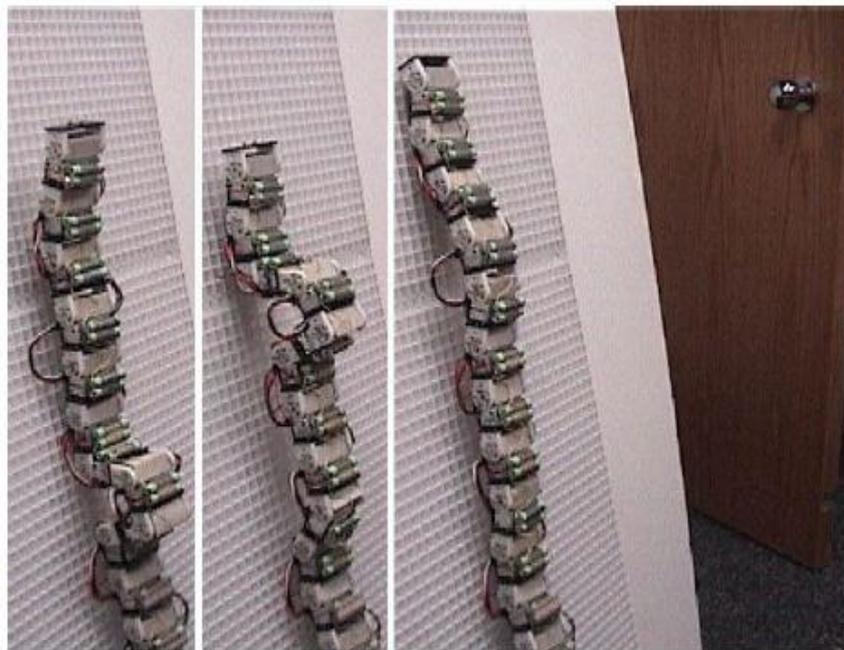
A Programmable Robot with the Behavior of Matter

Agnes

agnes.zhang14@windowslive.com

+62-8788-1109-734

Hampir dalam setiap bidang ilmu teknik mengharapkan kehadiran suatu sistem yang memiliki kemampuan untuk dapat beradaptasi, bertumbuh, memperbaiki, dan bahkan mereplika sistemnya sendiri. Dengan mengadaptasi sistem tubuh manusia yang multiselular, para ilmuwan mulai menerapkan sistem modular pada robot. Idenya adalah membuat robot yang mempunyai morfologi yang dapat diubah sesuai dengan kebutuhan. Sistem modular merupakan pendekatan dengan konsep membagi suatu sistem menjadi bagian-bagian kecil yang independen sehingga dapat digunakan pada sistem lain untuk tujuan yang berbeda.



Gambar 1. *Snake-Like Robot* melakukan panjat permukaan vertikal

Robot dengan sistem modular umumnya tersusun atas bagian-bagian kecil yang disebut blok atau modul. Setiap modul umumnya memiliki sifat dan karakteristik yang homogen, namun dapat membentuk suatu kesatuan unit modul yang memiliki fungsi-fungsi tertentu yang spesifik. Sifat dan karakteristik setiap modul yang homogen memudahkan penambahan dan pengurangan unit modul untuk mengembangkan dan memperbaiki sistemnya, serta beradaptasi dengan lingkungan yang membutuhkan penyesuaian sistem dan bentuk. Selain itu dimungkinkan juga untuk melakukan penambahan modul dengan fungsi khusus untuk menunjang penyelesaian tugas. Dengan sistem modular, robot dengan kompleksitas bentuk dan ragam jenis dapat dibentuk dari kumpulan sistem diskrit yang homogen.

Seperti pada *Snake-Like Robots* yang merupakan kumpulan modul diskrit homogen yang mengadaptasi bentuknya dari morfologi ular. Robot ini memiliki kemampuan gerak panjat yang adaptif sesuai dengan permukaan. *Snake-Like Robots* dapat melakukan panjat pada permukaan vertikal, serta kemudian menyesuaikan bentuknya menjadi rantai *closed-loop* untuk melakukan panjat tangga, dan penyesuaian lainnya untuk permukaan panjat yang berbeda. Setelah misi panjat selesai, *Snake-Like Robots* dapat dialih-fungsikan untuk kepentingan misi lainnya, yang mungkin saja memerlukan bentuk dan sistem yang berbeda dari semula.

Sistem modular menjanjikan fleksibilitas bentuk, ketahanan, dan biaya rendah dibandingkan dengan robot dengan sistem konvensional yang dimana untuk menyelesaikan satu permasalahan membutuhkan satu robot khusus, yang jelas membutuhkan biaya yang banyak. Robot dengan sistem modular dapat diaplikasikan pada tugas-tugas yang membutuhkan robot dengan inteligensi yang dapat mengatur dan menyesuaikan dirinya sendiri dengan kondisi yang dihadapi tanpa ada kehadiran manusia. Konsep aplikasi yang telah diajukan sampai saat ini adalah penggunaan robot modular untuk melakukan penjelajahan luar angkasa, *adaptive furniture*, dan pencarian dalam situasi pasca bencana/perang.

Penjelajahan luar angkasa dengan menggunakan robot perlu memenuhi beberapa kriteria seperti *saving space*, *saving weight*, serta *increasing robustness*. Penggunaan robot konvensional pada penjelajahan luar angkasa belum efektif dikarenakan sulit terpenuhinya tiga kriteria tersebut. Robot modular memiliki kemampuan penyesuaian bentuk sesuai dengan status tugas yang sedang dijalankan, dan ukurannya yang kecil memudahkan penyimpanan robot modular dalam bentuk paket sehingga menghemat penggunaan ruang. Ukuran robot modular yang kecil dan ringan dapat mengurangi biaya pengiriman robot ke luar angkasa. Selain itu robot modular yang mampu memperbaiki dirinya sendiri (*self-reconfigurable*) meningkatkan ketahanan robot dalam melakukan misi penjelajahan. Modul yang mengalami kerusakan dapat dengan mudah diganti dengan modul lain yang serupa.

Adaptive furniture memanfaatkan kemampuan *polymorphing* MSR (*Modular Self-Reconfigurable Robot*) untuk menjadi berbagai jenis perabot rumah tangga sesuai dengan kebutuhan pemiliknya. MSR dapat menjadi kursi, sofa, meja makan, dan bentuk lainnya.

Keberadaan *adaptive furniture* menghemat penggunaan ruang seiring dengan semakin sempitnya lahan perumahan sehingga tuntutan perabot yang fleksibel dan mudah disimpan semakin tinggi. Kehadiran *adaptive furniture* atau *roombots* mengurangi kebutuhan akan perabot yang sebenarnya tidak seluruhnya digunakan pada waktu bersamaan. Dengan bentuk yang adaptif, pengeluaran untuk belanja perabot dapat dipangkas dan tingkat efisiensi perabot menjadi tinggi (tidak perlu membeli perabot tambahan). Bentuk dan desain perabot dapat diubah sewaktu-waktu sesuai dengan tren dan selera pemilik perabot.

Bencana alam maupun bencana lainnya akibat dari perbuatan manusia seringkali mengakibatkan kerusakan pada infrastruktur bangunan serta tumbang pohon-pohon besar, atau dalam kasus Tsunami, mengakibatkan terjadinya penumpukan infrastruktur bangunan beserta sampah. Terjadinya bencana alam seringkali memakan korban luka maupun korban jiwa yang terkubur dalam reruntuhan infrastruktur bangunan atau tertimbun tanah longsor, atau ruang sempit lainnya. Lokasi pencarian pasca terjadinya bencana merupakan medan yang berat untuk melakukan tindak penyelamatan dan sering kali malah membahayakan jiwa tim penyelamat itu sendiri. Gagasan untuk mengaplikasikan MSR pada pencarian dalam situasi pasca bencana akan memudahkan penjangkauan ruang sempit tempat korban tertimbun. MSR akan melakukan penyesuaian modul-modulnya agar dapat menjangkau ruang sempit tersebut akan menyampaikan lokasi korban kepada tim penyelamat.

Robot modular bukanlah konsep yang hanya sekedar khayalan atau imajinasi semata. Pengembangan robot modular sendiri sudah dimulai semenjak tahun 1988, diprakarsai oleh Dr. Toshio Fukuda yang menghasilkan CEBOT atau *cellular robot*. Tantangan yang masih terus menghantui para pihak pengembang adalah bagaimana cara untuk menjadikan suatu teori atau konsep dapat diterapkan dengan baik dalam pelaksanaan praktisnya. Dalam 20 tahun terakhir ini telah banyak dilakukan percobaan dan simulasi dalam jumlah unit modul terbatas untuk merumuskan masalah-masalah dan meningkatkan kompleksitas struktur dalam pembangunan sistem modular pada robot. Namun untuk kedepannya juga perlu dilakukan pengembangan dalam jumlah unit yang banyak karena untuk membentuk sistem yang dapat melakukan *self-organizing* yang optimal membutuhkan paling sedikit 1000 unit modul dalam sistem, seperti halnya pada sistem modular pada sel-sel hidup.

Permasalahan yang akan dihadapi dalam pengembangan robot modular tentunya akan berbeda dengan robot konvensional. Robot modular membutuhkan *hardware* yang dapat diprogram dengan kemampuan adaptasi terhadap satu atau lebih properti fisik lain. Mekanika robot modular juga perlu dihitung presisi untuk menunjang kemampuan *self-assembly* maupun *self-reconfiguring* namun tidak mengganggu fleksibilitas bentuk dan pergerakan robot itu sendiri. Konsumsi daya juga perlu diatur sedemikian rupa agar penambahan unit/blok dapat dilakukan dalam jumlah yang banyak. Bahkan bila diperlukan setiap unit dapat melakukan transfer daya kepada unit lainnya yang membutuhkan. Serta masih banyak masalah lainnya dari segi *hardware* yang perlu ditinjau untuk melakukan aransemen modul-modul yang homogen namun adaptif.

Jumlah unit modul yang relatif banyak pada suatu sistem merupakan tantangan tersendiri dalam memikirkan algoritma kontrol yang tepat untuk robot modular. Modul, sensor serta aktuator dalam jumlah banyak dan jarak dekat meningkatkan kesulitan dan kemungkinan *error*. *Software* kontrol berperan sangat penting sekali untuk memainkan otonomi pada modul. Setiap modul yang ada pada harus sistem selalu terkoordinasi dan tersinkronisasi dengan bagian-bagian lainnya secara real-time sesuai dengan perintah kontrol dari *software*. Selain itu idealnya adalah algoritma kontrol sistem yang digunakan dapat digunakan pada sistem yang berskala, jadi tidak hanya berlaku pada sistem dengan jumlah modul sedikit, namun juga berlaku jika sistem diekspansi.

Secara umum, setiap modul robot terdiri atas bagian struktur dan fungsi fisik, *docking system*, sensor dan aktuator, serta *power* dan I/O data. Lain halnya dengan robot konvensional yang memiliki gerak dan bentuk yang terbatas, desain robot modular harus berdasarkan konsep DoF (*Degree of Freedom*). Serta tidak lupa untuk efisiensi yang lebih tinggi, ukuran serta bentuk modul dasar juga harus diperhitungkan agar dapat membentuk formasi bentuk yang solid. Bentuk yang disarankan adalah bentuk yang umum dan dapat sesuai untuk mengisi bentuk lainnya dari bentuk dasar tersebut (*space filling shape*). Semakin kecil akan semakin baik karena akan lebih mudah untuk melakukan penyesuaian bentuk sistem dan fabrikasi unit dalam jumlah banyak akan lebih hemat biaya.

Docking system merupakan bagian antarmuka robot modular yang berfungsi untuk menyambungkan modul-modul agar menjadi kesatuan sistem yang utuh. Pada beberapa

variasi MSR seperti Pebble dan Miche menggunakan medan magnet sebagai *docking system*, sementara pada variasi lainnya menggunakan konektor *male/female* pada permukaan robot modular. Pemilihan *docking system* hendaknya disesuaikan dengan bentuk desain robot modular.

Sensor dan aktuator juga merupakan bagian penting dari robot modular. Sensor digunakan oleh MSR untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada lingkungannya, dan kemudian informasi tersebut diolah oleh robot untuk melakukan otomasi tertentu (*smart robot*). Lokasi dan derajat modul lain yang berada dekat dengan sistem utama dapat terdeteksi dengan sensor seperti *infrared* dan *accelerometer*. Sensor juga memiliki peran dalam proses *docking*. Sistem akan diinformasikan apakah perlu melakukan *docking* dengan modul yang sedang berada dekat dengan sistem *master*, karena belum tentu diperlukan. Semakin banyak sensor dan aktuator (dalam jumlah yang sesuai) yang dimiliki oleh robot modular akan memperbesar DoF robot tersebut.

Pengembangan yang dilakukan sampai saat ini telah menghasilkan beberapa tipikal bentuk sistem modular berdasarkan arsitektur fisiknya, yaitu *chain*, *lattice*, *truss*, dan *free-form system*. *Chain system* merupakan arsitektur yang paling sederhana dimana setiap unit modul diatur sedemikian rupa untuk membentuk ikatan rantai tunggal maupun bercabang. robot modular tipe *chain* memiliki DoF yang cukup rendah mengakibatkan pergerakan yang dapat dilakukan oleh robot modular terbatas. Arsitektur *chain* terdiri atas 2 modul dasar yaitu *segment* dan *node*. *Segment* merupakan modul dengan 2 DoF yang dapat melakukan kontraksi (pemanjangan) serta arah gerak kanan dan kiri. Pada *segment* juga terdapat mikroprosesor untuk melakukan pengolahan sudut dan gaya. Sementara itu *node* merupakan bagian yang pasif (tidak bergerak) dengan konektor pada setiap sisi permukaannya untuk melakukan *docking*. Konektor tersebut merupakan konektor yang simetri 4 arah sehingga memungkinkan untuk melakukan pergerakan 3 dimensi. *Node* juga merupakan sumber *power* robot modular tipe *chain*.

CONRO (Castano et al.) merupakan salah satu robot modular tipe *chain* dengan 2 modul motor servo yang memungkinkan pergerakan kontraksi. Sistem CONRO dapat mengadaptasi bentuk ular dan melakukan gerak jalan yang *multijoint*. M-TRAN (Murata et al.) merupakan contoh lain robot modular tipe *chain* yang sudah mengalami banyak pengembangan, revisi

dan kemajuan berarti. 2 *Parallel Rotational* DoF yang terdapat pada setiap sisi modul mengakibatkan setiap modul M-TRAN dapat melakukan *docking* dari 2 posisi sudut, yaitu 0° dan 90° serta melakukan aktuasi secara paralel. Kemudian pengembangan selanjutnya dari M-TRAN merupakan YaMoR (Marbach dan Ijspeert) dengan 1 DoF namun menggunakan metode Powell untuk mengoptimisasi fungsi.

Superbot, PolyBot, CKBot, dan Molecube merupakan pengembangan lanjutan dan yang paling baru dari robot modular dengan arsitektur *chain*. Molecube (Lipson et al.) merupakan robot modular tipe *chain* dengan 1 DoF namun dapat melakukan gerak 3 dimensi. Bagian yang dapat melakukan rotasi diletakkan pada posisi diagonal terpanjang dari pojok berlawanan tiap modul robot. Peletakan aktuator pada diagonal memungkinkan melakukan gerak 3 dimensi tanpa harus memiliki DoF yang banyak biarpun jumlah DoF yang sesuai akan memberikan fleksibilitas bentuk dan gerak yang lebih.

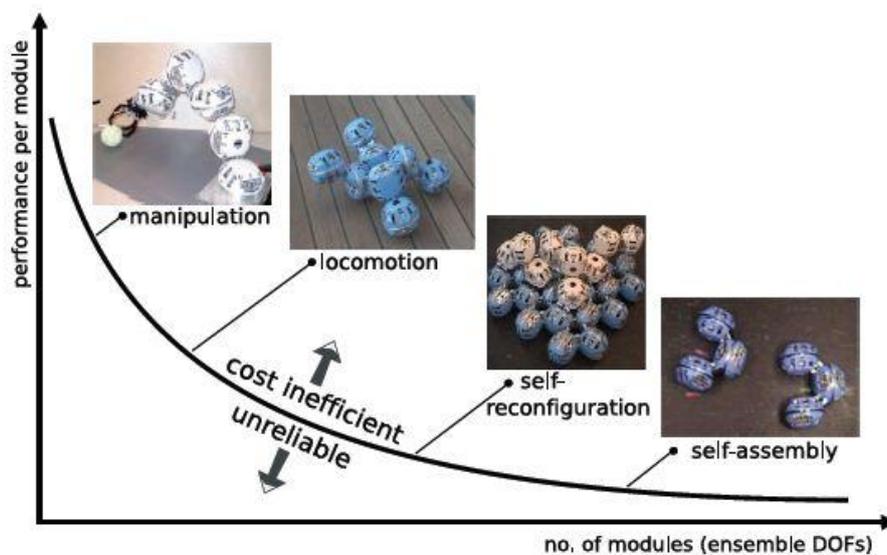
Berbeda dengan *chain system*, pada *lattice system* dibutuhkan unit-unit modul untuk posisi-posisi diskrit 3 dimensi tertentu. Posisi setiap modul ditentukan secara diskrit dan modul diperintahkan untuk mengisi posisi tersebut. Model arsitektur *lattice* juga dapat menyerupai model arsitektur *chain*, yaitu dengan mengatur sedemikian rupa letak setiap modul untuk membentuk ikatan rantai. Dibandingkan dengan tipe *chain*, kontrol dan pergerakan pada sistem *lattice* dapat dilakukan secara paralel dan lebih mudah untuk melakukan *self-reconfiguration* karena setiap modul merupakan sistem yang diskrit.

Tentunya untuk setiap tipe arsitektur yang ada memiliki ciri, karakteristik, dan metode pemrograman yang berbeda-beda, seperti halnya pada dua tipe arsitektur lain yang baru mulai berkembang, yaitu *truss system* dan *free-form system*. *Truss system* maupun *free-form system* memiliki tingkat fleksibilitas bentuk yang lebih beragam dibandingkan dengan *chain system*.

Selanjutnya dari berbagai macam tipe arsitektur tersebut dilakukan pengembangan fungsi seperti halnya *self-assembly* maupun *self-reconfiguration*, atau fungsi lainnya sesuai dengan tipe arsitekturnya. *Self-assembly and self-disassembly system* seperti yang dipublikasikan oleh Rus et al. dengan menggunakan modul *Smart Pebble* dari tipe arsitektur *lattice system* yang berukuran 12 mm. Sistem diuji coba dengan 16 modul dengan salah satunya merupakan *root module* yang mengatur serta mengarahkan modul-modul lain dalam sistem

untuk berkumpul/menyatu pada suatu titik/lokasi tertentu. Uji coba yang dilakukan Rus et al. menghasilkan *error rate* yang kecil (1.5%) dari 25 kali percobaan.

Algoritma yang digunakan pada *self-assembly system* mudahnya hanya melakukan deteksi keberadaan modul lain disekitar sistem untuk menentukan apakah akan dilakukan docking/bonding dengan sistem sehingga menjadi kesatuan, atau tidak. Modul yang telah mengalami *self-assembly*, salah satu bentuk pemisahannya (*self-disassembly*) adalah melalui 4 tahap yaitu *model formation*, *virtual sculpting*, *shape distribution*, dan *disassembly*. Sebelum sampai pada tahap *disassembly*, setiap modul anggota mengirimkan koordinat lokasinya pada saat tersebut, kemudian informasi tersebut akan disimpan pada aplikasi GUI user, bukan pada *root module*. Kemudian GUI akan menganalisa bentuk dari lokasi tersebut dan mengirimkan pesan koordinat kembali kepada *root module* untuk menyesuaikan bentuknya (*disassembly phase*).



Gambar 2. Perbandingan performa dengan jumlah modul ATRON

Kebalikan dari *self-assembly system* yang telah berhasil dilakukan, melakukan *self-reconfiguration* merupakan salah satu tantangan terbesar dalam menjadikan MSR suatu kenyataan. Belum ada sampel maupun contoh algoritma kontrol yang dapat diterapkan secara otomatis pada sistem yang lebih dari apa yang sudah ditetapkan sebelumnya pada MSR. Penelitian dan pengembangan yang masih terus berjalan rata-rata baru mencari solusi bagaimana melakukan *self-reconfiguration* dalam dua bentuk saja. Hal ini menandakan

bahwa sampai sekarang belum ada algoritma *self-reconfiguration* umum yang dapat diterapkan untuk berbagai ragam bentuk dan sistem.

M-TRAN dan ATRON (*modular self-reconfigurable robots*) sendiri dikatakan telah sukses melakukan *self-reconfiguration* secara 3 dimensi. Tapi semuanya hanyalah hasil dari banyak sekali percobaan dan kegagalan, dan masih merupakan demonstrasi semata. Pendekatan yang dilakukan terhadap *hardware* (modul) secara dasar juga belum maksimal sehingga *self-reconfiguration* belum sepenuhnya berhasil. Sampai sekarang seluruh modul yang telah dikembangkan belum dipublikasikan secara umum dikarenakan masih dalam bentuk *prototype* yang memiliki banyak kekurangan.

Persediaan daya robot modular merupakan masalah yang juga masih terus dicari solusinya. Diperlukan suatu cara yang dapat melakukan transfer daya antar modul karena jumlah unit modul pada sistem yang banyak akan menyebabkan bertambahnya konsumsi daya sistem. Terakhir pada tahun 2011, Stoy et al. seperti pada tulisannya yang berjudul *Wireless Communication and Power Transfer in Modular Robots* mengembangkan sistem untuk melakukan transfer daya antar modul dengan menggunakan sistem *wireless*. Secara praktikal, Stoy menyatakan bahwa transfer daya dengan sistem *wireless* tidaklah efisien bila dilakukan untuk *supply* daya dalam jangka waktu yang lama. Namun sistem ini dapat diterapkan untuk melakukan pengisian daya apabila dibutuhkan terhadap modul secara diskrit maupun dalam bentuk kesatuan.

Modular Robot merupakan sistem yang menjanjikan perubahan teknologi yang memiliki dampak luar biasa pada kehidupan manusia. Dengan sistem modular pada robot: sistem dengan ketahanan yang tinggi, biaya rendah, serta kemampuan adaptasi akan meningkatkan efisiensi dalam penyelesaian berbagai macam misi. Nyatanya masih dibutuhkan banyak sekali revisi, inovasi, serta pengembangan pada sistem modular yang telah berkembang sampai saat ini untuk mencapai optimisasi sistem yang terbaik. Sampai saat terakhir modular robot baru mencapai tahap demonstrasi *self-assembly* dan *self-reconfiguring* yang sederhana, sementara masih belum seluruh tantangan dapat diselesaikan seperti *adaptive large system*, *self-repairing system*, *self-sustaining system*, *self-replication* dan *self-extension*. Dengan pengenalan singkat, gambaran masalah, dan keuntungan yang dapat dicapai, harapannya bidang ini akan terus bertumbuh.

REFERENCES

- [1] K. Gilpin and D. Rus, "Modular Robot Systems," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 38-55, September 2010.
- [2] M. Yim, D. G. Duff and K. Roufas, "Modular Reconfigurable Robots, An Approach To Urban Search and Rescue," in *Human-friendly Welfare Robotics Systems*, Taejon, 2000.
- [3] M. Yim and J. Suh, "A Complete, Local and Parallel Reconfiguration Algorithm for Cube Style Modular Robots," in *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Washington, DC, 2002.
- [4] J. W. Suh, S. B. Homans and M. Yim, "Telecubes: Mechanical Design of a Module for Self-Reconfigurable Robotics," in *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Washington, DC, 2002.
- [5] H. Y. K. Lau and A. W. Y. Ko, "Coordination of Cooperative Search and Rescue for Robot Disaster Relief," in *17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, 2008.
- [6] M. Yim, W. M. Shen, B. Salemi, D. Rus, M. Moll, H. Lipson, E. Klavins and G. S. Chirikjian, "Modular Self-Reconfigurable Robot Systems," *IEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 43-52, March 2007.
- [7] M. Yim, K. Roufas, D. Duff, Y. Zhang, C. Eldershaw and S. Homans, "Modular Reconfigurable Robot in Space Applications," *Autonomous Robot Journal*, no. Special Issue for Robots in Space, 2003.
- [8] M. Yim, S. Homans and K. Roufas, "Climbing with Snake-Like Robots," in *IFAC Workshop on Mobile Robot Technology*, Jeju, 2001.
- [9] A. Sprowitz, S. Pouya, S. Bonardi, J. v. d. Kieboom, R. Mockel, A. Billard, P. Dillenbourg and A. J. Ijspeert, "Roombots: Reconfigurable Robots for Adaptive Furniture," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, pp. 20-32, August 2010.
- [10] M. d. P. O. Carbera, R. S. Trifonov, G. A. Castells and K. Stoy, "Wireless Communication and Power Transfer in Modular Robots," in *IROS Workshop on Reconfigurable Modular Robotics: Challenges of Mechatronic and Bio-Chemo-Hybrid Systems*, San Francisco, 2011.
- [11] K. Stoy and H. Kurokawa, "Current Topics in Classic Self-Reconfigurable Robot Research," in *IROS Workshop on Reconfigurable Modular Robotics: Challenges of Mechatronic and Bio-Chemo-Hybrid Systems*, San Francisco, 2011.
- [12] Y. Zhang, K. Roufas, C. Eldershaw, M. Yim and D. Duff, "Sensor Computation in Modular Self-Reconfigurable Robots," *Experimental Robotics: Advanced Robotics Series*, vol. VIII, 2003.

- [13] K. Roufas, Y. Zhang, D. Duff and M. Yim, "Six Degree of Freedom Sensing For Docking Using IR LED Emitters and Receivers," *Experimental Robotics*, vol. VII, no. 271, 2001.
- [14] Y. Zhang, K. D. Roufas and M. Yim, "Software Architecture for Modular Self-Reconfigurable Robots," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Hawaii, 2001.
- [15] M. Bordignon, D. J. Christensen, K. Stoy and U. P. Schultz, "Elements of a Development Ecosystem for Modular Robot Application," in *4th International Workshop on Software Development and Integration in Robotics*, 2009.
- [16] N. Ranasinghe and W. M. Shen, "Autonomous Adaptation to Simultaneous Unexpected Changes in Modular Robots," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Fransisco, 2011.