

RÉALISATIONS DYNAMIQUES

RAFFAELLO D'ANDREA

Mon travail est axé sur la création de systèmes qui mettent en œuvre des innovations technologiques et des principes scientifiques liés aux mathématiques avancées, aux algorithmes, à l'art et au design, avec un intérêt particulier pour les techniques avancées de *motion control*. Du fait de leur nature, ces créations doivent être réalisées par une équipe. Beaucoup sont le résultat de recherches que je mène avec mes étudiants de troisième cycle. Elles sont également le fruit de collaborations avec des architectes, des entrepreneurs et des artistes. J'espère que ces créations nous amèneront à repenser le rôle que la technologie devra jouer dans l'avenir.

— RoboCup (1998 - 2005)

Annoncée comme une initiative internationale de recherche et d'enseignement visant à promouvoir la recherche sur l'intelligence artificielle et la robotique, la *RoboCup* est un tournoi de football opposant des équipes de robots sur un terrain de taille réduite. Les robots doivent jouer de façon autonome, sans l'aide d'opérateurs humains. → FIGURE #1

En tant qu'architecte système intervenant au sein des universités, j'ai fondé l'équipe de *RoboCup* de l'Université Cornell à l'automne 1998, lors de ma première année en tant que professeur assistant. La compétition n'en était alors qu'à ses débuts : l'été 1999 devait voir se dérouler seulement la troisième édition de cette

compétition internationale. J'ai tenu un cours durant toute l'année, ouvert aux étudiants de niveau licence et master, avec les deux objectifs principaux suivants :

1) Gagner la *RoboCup* à Stockholm, en Suède, lors de l'été 1999.
2) Gagner la *RoboCup* l'année suivante. Le premier objectif était clair : il motivait les étudiants à créer l'une des toutes meilleures équipes. Par ailleurs, le second objectif était une manière détournée de sensibiliser les membres de l'équipe aux caractéristiques essentielles d'un système d'ingénierie exemplaire : transparence, facilité de maintenance, simplicité d'opération à l'intérieur des limites opérationnelles. Les équipes suivantes devaient être en totalité composées de nouveaux membres, et un système excessivement compliqué, mal documenté ou fragile mettrait les équipes suivantes dans une situation difficile. Une structure organisationnelle intéressante a émergé grâce au second objectif : un petit groupe de recherche et développement au sein de l'équipe. Ce groupe avait la responsabilité d'explorer des designs à haut risque mais au potentiel élevé qui pourraient être exploités par les futures équipes.

L'équipe était composée d'un ensemble pluridisciplinaire d'environ trente étudiants en génie mécanique, électrotechnique, informatique, recherche opérationnelle et génie industriel. Travailler avec des experts dans différents domaines est depuis devenu une habitude au cours de mes différents projets.

Cette équipe a marqué l'histoire de la *RoboCup* : les « Big Red Bots » ont gagné quatre championnats au cours des années suivantes, et se sont retirés en 2005 après avoir été l'équipe de *RoboCup* cumulant le plus grand nombre de victoires. Au fil du temps, nous avons introduit diverses innovations dans cette compétition : des

DYNAMIC WORKS

RAFFAELLO D'ANDREA

My work is focused on making creations that leverage technological innovation, scientific principles, advanced mathematics, algorithms, and the art of design in unprecedented ways, with an emphasis on advanced motion control. By their very nature, these creations require a team to realise. Many are enabled by the research I conduct with my graduate students. Many are also the fruit of collaborations with architects, entrepreneurs, and artists. My hope is that these creations inspire people to rethink what role technology should have in shaping our future.

— RoboCup (1998 - 2005)

Billing itself as an international research and education initiative, the goal of which is to foster artificial intelligence and robotics research, the *RoboCup* soccer challenge pits teams of robots against each other on a reduced field. The robots must play the game autonomously; there are no human operators. → FIGURE #1

In the fall of 1998, during my first year as assistant professor at Cornell University, I founded the Cornell *RoboCup* team, taking on the role of system architect and faculty advisor. The competition at that time was still in its infancy: summer of 1999 would be only the third year of international competition. I developed a year-long course, open to undergraduate and graduate students, with the following two main objectives:

1) To win the *RoboCup* competition in

Stockholm, Sweden, in the Summer of 1999.
2) To win the *RoboCup* competition the following year.

The first objective was clear: it motivated the students to build a world-class team. The second objective, on the other hand, was an indirect way to expose the team members to key attributes of successful, sophisticated engineered systems: transparency, maintainability, and simplicity within their operational constraints. Subsequent teams would be composed of almost entirely new members, and an overly complicated, poorly documented, or fragile system would put future teams at a disadvantage. An interesting organisational structure that emerged from the second objective was a small research and development group within the team. This group was responsible for exploring high-risk, high-reward design strategies that could be used by future teams.

The team consisted of a multidisciplinary mix of roughly thirty students from mechanical engineering, electrical engineering, computer science, operations research and industrial engineering. Working with experts from different areas has since become a common thread in most of my projects.

The team made *RoboCup* history — the “Big Red Bots” won 4 championship titles over the next several years, retiring from competition in 2005 as the most successful *RoboCup* team to date. In the process, we introduced various innovations to the competition: omni-directional vehicles, dribbling, and trajectory generation algorithms for agile robot motions. → FIGURES #2 #3

— The Table (2000 - 2001)

The Table is a collaboration with Canadian artist Max Dean, and was my first



#1

véhicules omnidirectionnels, le *dribble*, et des algorithmes de génération de trajectoire pour améliorer l'agilité des robots.

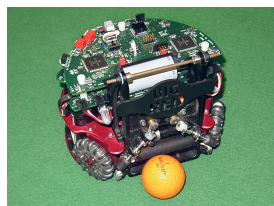
→ FIGURES #2 #3

— The Table (2000 - 2001)

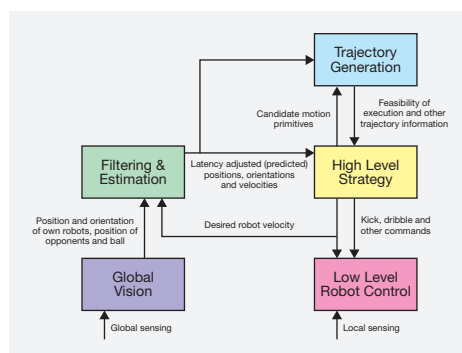
Fruit d'une collaboration avec l'artiste canadien Max Dean, *The Table* est aussi mon premier projet réalisé avec une personne entièrement liée au domaine de l'art. Ce projet a exercé une grande influence sur nombre de mes projets ; il m'a ouvert au principe d'une création pour elle-même, indépendante de toute utilité directe, immédiate, commerciale ou autre. Selon l'idée de Max, l'installation devait inverser les rôles du spectateur et de l'œuvre d'art. L'œuvre d'art répond à un spectateur, qui devient l'objet d'attention des autres spectateurs. → FIGURE #4

Une camera vidéo au plafond suit les déplacements du visiteur choisi et de *The Table*, dont les mouvements sont contrôlés par divers algorithmes spécifiquement programmés. Si la personne choisie ne réagit pas, *The Table* insiste, en le suivant dans la pièce. Ce faisant, *The Table* inverse les rôles du spectateur et de l'objet d'art. L'attention des autres visiteurs est centrée sur la personne « choisie » par *The Table*, qu'elle constitue ainsi comme un objet d'attention.

The Table n'interagit pas avec tout le monde, mais avec une seule personne



#2



#3

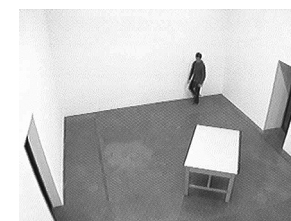
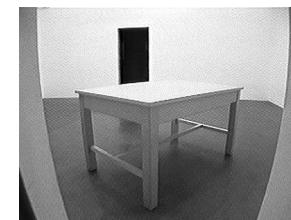
à la fois. Dans un article qui a fait la une du magazine *Border Crossings*, Robert Enright décrit ainsi la rencontre entre les visiteurs et *The Table* : « Un jeune homme perturbé semble prêt à engager la table en combat singulier ; une famille, d'abord méfiante, se laisse finalement prendre au jeu ; une femme finit par danser un pas de deux impromptu avec la table. Mais la rencontre la plus marquante vient d'un couple de femmes qui réagissent différemment aux mouvements de l'objet. Lorsque l'une d'entre elles pose la main sur la table, celle-ci s'éloigne brusquement. "Je ne crois pas qu'elle aime qu'on la touche", fait-elle remarquer. Puis son amie place sa main sur la table, dans un mouvement proche d'une caresse, et le meuble nerveux ne bouge pas. La réaction de la première femme est frappante, semblable à la plainte de celui qui a été déçu par l'amour : "Oh, peut-être que c'est ma faute", murmure-t-elle. »

collaboration with someone whose sole profession is to make art. It has had a large influence on many of my subsequent projects; in particular, it opened my mind to creation for its own sake—decoupled from direct, immediate utility, commercial or otherwise. Max's vision for the installation was to switch the role of viewer and artwork. → FIGURE #4

Driven by custom algorithms and guided by an overhead camera system, the table first selects one person among the visitors in the gallery space. It then seeks to form a relationship with that person, moving forward, for example, and then waiting for the chosen person to move forward, backward or sideways in response, before responding with a new movement in return. If the chosen person is unresponsive, the table "tries" harder to elicit a response, perhaps following him or her around the gallery space.

The table does not interact with just anyone. Robert Enright reports in the cover story of "Border Crossings" how visitors encounter *The Table*: "One perturbed young man seems prepared to engage the table in a combat; a family is initially wary and ultimately playful; a woman ends up dancing with the table in an unrehearsed pas de deux. But the most telling encounter comes from a pair of women who display mixed reactions to the table's movements. When one of them puts her hand on the table, it abruptly moves away. 'I don't think it likes to be touched,' she says. Then her friend places her hand on the table in what comes close to a caress and the edgy piece of furniture doesn't move. The response of the first woman is heartbreaking, the lament of anyone who has been jilted in love: 'Oh, maybe it's just me', she whispers."

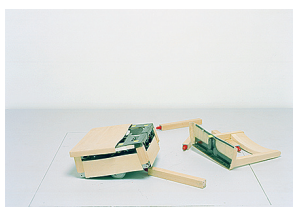
The Table was first unveiled in 2001 at the Venice Biennale, and is now a part of the National Gallery of Canada's permanent collection.



#4

— Robotic Chair (2004 - 2006)

The *Robotic Chair* is a collaboration with Canadian artists Max Dean and Matt Donovan. This was my second collaboration with Max Dean, and my first formal collaboration with Matt Donovan; I had worked with Matt before (on the mechanical redesign of *The Table*) and the prospect of working with this extremely talented designer again, was one of the main reasons why I decided to tackle this project. → FIGURE #5



#5

designer talentueux fut l'une des raisons qui m'incitèrent à me lancer dans ce projet.

→ FIGURE #5

Robotic Chair se présente comme une chaise ordinaire en bois. Toutefois, à la différence de la plupart des chaises, elle se disloque et se réassemble ; elle est guidée par un système de vision globale et contrôlée par un ordinateur externe via un réseau sans fil. Son comportement est dirigé par divers algorithmes, le logiciel étant défini de telle façon que le système puisse apprendre de son environnement.

Robotic Chair cache ses éléments mécaniques et de contrôle sous un simple placage de bois, ce qui en fait un objet de haute technologie sous une apparence des plus anodines. Tandis que la chaise s'effondre, se reforme et se réassemble encore et encore, elle nous rappelle non seulement notre faillibilité, mais également notre capacité innée à nous renouveler.

Depuis sa réalisation en 2006, *Robotic Chair* a été exposée à la conférence Idea-City au Canada, à Ars Electronica en Autriche, à ARCO en Espagne, au Cabaret Voltaire (lieu de naissance de Dada) en Suisse, à la London Art Fair, entre autres expositions internationales. Elle fait partie des collections permanentes du musée des Beaux-Arts du Canada.

— Kiva Systems (2003 -)

Kiva met en œuvre plusieurs centaines de robots mobiles et un puissant logiciel de contrôle pour offrir un système complet de logistique : stockage, déplacement et tri des stocks. Au lieu d'être rangés sur des rayons statiques, des chariots mobiles ou des tapis roulants, les produits sont entreposés sur des nacelles de stockage mobiles rassemblées au centre de l'entrepôt tandis que les opérateurs se tiennent à des stations d'inventaire situées en périphérie. → FIGURE #6



#6

The *Robotic Chair* looks like a generic wooden chair. Unlike most chairs, however, this one falls apart and puts itself back together. It is guided by an overhead vision system and controlled over a wireless network by an external computer. Various algorithms govern the chair's behavior, while the software is structured in such a way that the system can learn from its environment.

The *Robotic Chair* keeps its controls and technology hidden under a simple wooden veneer, making it high-tech in the most unassuming way. As the chair falls apart, gathers itself together and picks itself back up again and again, it reminds us not only of our fallibility, but also of our innate capacity for re-creating ourselves.

Since its completion in 2006, the *Robotic Chair* has been exhibited at Idea-City in Canada, ARS Electronica in Austria, ARCO in Spain, the Cabaret Voltaire —

the birthplace of Dada—in Switzerland, and the London Art Fair, along with many other international venues. It is now a part of the permanent collection at the National Gallery of Canada.

— Kiva Systems (2003 - present)

Kiva uses hundreds of mobile robots and powerful control software to provide a complete warehouse fulfillment solution for storing, moving and sorting inventory. Instead of being stored in static shelving, flow racks or carousels, products are stored in inventory pods in the center of the warehouse while operators stand at inventory stations around the perimeter. → FIGURE #6

When an order is received, robotic drive units retrieve the appropriate pods and bring them to the worker, who picks out the required item and places it in the carton. Completed orders are stored on separate pods, ready to get up and move

Présentée en 2001 à la Biennale de Venise, *The Table* fait désormais partie des collections permanentes du musée des Beaux-Arts du Canada.

— Robotic Chair (2004 - 2006)

Robotic Chair est le résultat d'une collaboration avec les artistes canadiens Max Dean et Matt Donovan. Ce fut ma deuxième collaboration avec Max Dean, et la première officielle avec Matt Donovan ; j'avais déjà travaillé avec Matt (sur une modification mécanique de la *Table*), et la perspective de travailler à nouveau avec ce

Lorsqu'une commande est reçue, des unités de transport robotisées récupèrent les nacelles de stockage appropriées et les apportent aux employés, qui en extraient les produits désirés et les placent dans le carton. Les commandes une fois traitées sont rangées sur des nacelles séparées, prêtes à se mettre en route vers les quais de chargement lorsque le camion arrive. Une série de capteurs placés sur les unités de transport, secondée par le logiciel et les algorithmes de contrôle, permet au véhicule de parcourir l'entrepôt sans heurts. L'ensemble est coordonné par un système de contrôle hiérarchisé, similaire à ce qui est utilisé dans les systèmes de contrôle du trafic aérien.

Les unités de transport se transmettent des informations concernant leur environnement et adaptent leur comportement en fonction de ces connaissances. Ainsi, le comportement des véhicules (et donc du système entier) s'améliore avec le temps. De plus, l'adaptation et l'apprentissage permettent au système de réagir intelligemment aux variations d'environnement.

Kiva a été fondée en 2003 par Mick Mountz, inventeur et promoteur de l'idée selon laquelle les produits stockés *doivent* se déplacer. Pete Wurman et moi-même avons rejoint Kiva en 2004 en tant que co-concepteurs techniques. Le rôle de Pete était de déterminer *où* le stock devait être déplacé : stockage, récupération et préparation des commandes. Mon rôle était de déterminer *comment* le stock se déplacerait : en utilisant des centaines de robots mobiles qui répondent et s'adaptent à leur environnement, de façon toujours sécurisée.

Beaucoup des premières recrues de Kiva étaient de mes anciens étudiants ou collaborateurs : Andrew Hoffman faisait partie de l'équipe de la *RoboCup* en 1999 ; Denis Polic a travaillé sur le micro-programme de bas niveau de *The Table*.

Eryk Nice (*RoboCup* 2002, maîtrise), Patrick Dingle (*RoboCup* 2003, licence), Josh Pollack (*RoboCup* 2000, maîtrise d'ingénierie), Sean Breheny (maîtrise), et Oliver Purwin (*RoboCup* 2001, 2003 et 2005, doctorat) ont également tous participé dès le début à Kiva.

Kiva est un excellent exemple du modèle de recherche et d'enseignement que j'ai adopté : l'environnement de l'université devrait permettre aux individus d'explorer des idées et concepts qui n'ont pas forcément d'utilité directe, afin de repousser les limites et permettre d'aboutir à ce qui n'a encore jamais été réalisé. Kiva résulte directement de cette philosophie. Mick a utilisé nos vidéos de la *RoboCup* sur internet pour convaincre de généreux investisseurs qu'il était possible dans un futur proche de pourvoir des entrepôts de milliers de robots (en fait, c'est comme ça que nous nous sommes rencontrés). Lorsque j'ai fondé l'équipe de *RoboCup* de Cornell, je n'imaginais pas qu'elle mènerait à une entreprise commerciale.

Kiva a connu une croissance rapide, avec un taux de croissance annuelle cumulé dépassant 100 % depuis 2006, et a été distinguée par *Inc. Magazine* comme la sixième croissance la plus rapide pour une société privée en Amérique en 2009. À la fin de l'année 2011, elle employait plus de trois cents personnes, et ses systèmes sont actuellement utilisés chez plus de 12 % des 100 vendeurs en ligne les plus importants, tels que Staples, Walgreens, ToysRUs, Saks 5th Avenue, Gap, et Timberland, dans des complexes situés aux États-Unis, au Canada et en Europe. Le plus grand entrepôt utilise plus de mille robots mobiles. → FIGURES #7 #8

— Balancing Cube (2007 -)

Mon principal collaborateur sur ce projet est le doctorant Sebastian Trimpe, qui



#7



#8

to the loading dock when the truck arrives. A suite of sensors on the drive units, along with custom control software and algorithms, allow the vehicles to safely navigate the warehouse. Coordination is aided by a hierarchical layer, similar to that used in air traffic control systems.

The drive units share information about their environment and use that knowledge to adapt. As a result, the performance of the robots—and hence the system—improves over time. In addition, adaptation and learning ensure that the system is robust to changes in the environment.

Kiva was founded by Mick Mountz in 2003: his was the vision of *why* inventory should move. Pete Wurman and I joined Kiva in early 2004 as technical co-founders. Pete was responsible for figuring out *where* the inventory should move: Storage, retrieval, and order fulfillment. I was responsible for figuring out *how* the inventory should move: Using hundreds of mobile robots that learn and adapt to their environment, in a provably safe way.

Many of the initial hires at Kiva were former students and collaborators of mine: Andrew Hoffman, employee number 4, was on the 1999 Cornell *RoboCup* team;

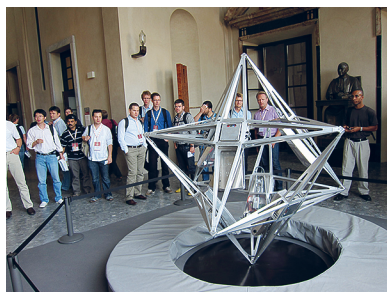
Denis Polic, employee number 5, worked on the low-level firmware for *the Table* project. Eryk Nice (2002 *RoboCup* and Master's student), Patrick Dingle (2003 *RoboCup* and Bachelor's student), Josh Pollack (2000 *RoboCup* and Master of Engineering student), Sean Breheny (Master's student), and Oliver Purwin (2001, 2003, 2005 *RoboCup* and PhD student) were also early contributors to Kiva.

Kiva is a great example of the research and teaching model that I have adopted: the university environment should allow individuals to explore ideas and concepts that do not necessarily have direct utility. The purpose should be to push students to do things that have never been done before. Kiva is a direct result of this philosophy. Mick used our *RoboCup* videos on the web to convince angel investors that it was possible to someday outfit warehouses with thousands of mobile robots (in fact, this is how we first met). When I founded the Cornell *RoboCup* team, I had no idea that it would lead to a commercial enterprise.

Kiva has been growing rapidly with a cumulative annual growth rate of over 100 % since 2006, and was recognised by *Inc. Magazine* as the 6th fastest growing private company in America in 2009. By the end of 2011 it employed 300+ people, and its systems are currently deployed with over 12 % of the Top 100 Internet Retailers such as Staples, Walgreens, ToysRUs, Saks 5th Avenue, Gap, and Timberland in facilities across the US, Canada, and EU countries. The largest warehouse uses over 1,000 mobile robots. → FIGURES #7 #8

— Balancing Cube (2007 - present)

My main collaborator on this project is PhD student Sebastian Trimpe. Sebastian is using the *Balancing Cube* as a testbed



#9

envisage le *Balancing Cube* comme banc d'essai pour le développement de nouveaux algorithmes dynamiques d'estimation et de contrôle distribués. En 2011, en compétition avec environ 450 publications, nous avons reçu le prix de la Publication Interactive du Congrès Mondial de l'IFAC.

Le *Balancing Cube* était initialement un projet de grande ampleur pour les étudiants de master à l'École polytechnique fédérale de Zurich en 2007. J'étais arrivé en Suisse à la fin de l'été 2007, avec pour objectif la formation d'un nouveau groupe de recherche. Notre but était de créer des objets dynamiques de pointe et des systèmes dotés de capacités de contrôle inédites. La motivation provenait largement du succès de Kiva. Matt Donovan m'a accompagné à Zurich et aidé à mettre en place le groupe de recherche en tant qu'artiste résident jusqu'en 2009. Notre groupe de recherche comporte actuellement quinze membres.

Le *Balancing Cube* peut tenir en équilibre sur n'importe quelle arête ou n'importe quel coin, grâce à un ensemble de six mécanismes rotatifs situés sur chaque face du cube. Tout comme les membres individuels d'une troupe d'acrobates, chaque mécanisme est coordonné avec les autres, poussant, tirant, et ajustant son propre barycentre pour maintenir l'équilibre.



#10

Chaque mécanisme d'équilibrage est un élément autonome intégrant alimentation électrique, capteurs, et moteurs. Les données relevées par les capteurs du mécanisme sont envoyées à son microcontrôleur. Celui-ci combine ses propres données avec celles relevées par les cinq autres mécanismes pour déterminer les commandes à envoyer au moteur. Le moteur applique un couple au mécanisme d'équilibrage, qui se déplace et ajuste le centre de gravité de l'ensemble du système.

Le couple influe aussi directement sur les mouvements du cube, ce qui fait de l'équilibre un problème particulièrement délicat : l'application du couple et le déplacement du centre de gravité du système sont souvent en conflit. Ce problème est similaire à celui rencontré par les funambules lorsqu'ils ajustent leur balancier.

→ FIGURES #9 #10

Le *Balancing Cube* a été présenté dans plusieurs expositions internationales, telles que l'IFAC World Congress de Milan et le Festival Della Scienze de Gênes.

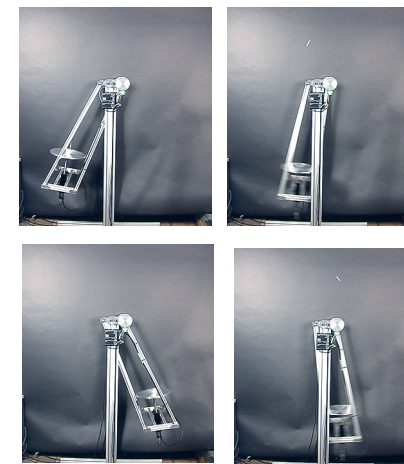
for developing new algorithms for event-based distributed estimation and control. We were recently awarded the 2011 IFAC World Congress Interactive Paper Prize for this work, competing with approximately 450 other papers.

The *Balancing Cube* started as a large, graduate-level class project at ETH Zurich in 2007. I had just moved to Switzerland in late summer of 2007, with the objective of starting a new research group. Our focus was to create cutting-edge dynamic objects and systems that could achieve unprecedented feats of control. The motivation was in large part due to Kiva's success. Matt Donovan made the move to Zurich with me, helped me start the research group from scratch, and was the group's Artist in Residence until 2009. We currently have more than 15 people in our research group.

The *Balancing Cube* can balance on any of its edges or corners, thanks to a series of six rotating mechanisms located on each face of the cube. Like individual members of an acrobatic troupe, each mechanism coordinates with the others, pushing, pulling and adjusting its own center of balance to keep in equilibrium.

Each balancing mechanism is a self-contained unit with onboard power, sensors, computer and motor. Data captured from the mechanism's sensors is sent to its computer. The computer combines its own sensor data with data received from its peers to issue appropriate commands to the motor. The motor applies torque to the balancing mechanism, which rotates and adjusts the center of gravity of the overall system.

The torque also directly affects the motion of the cube, making balance a particularly challenging problem: the applied torque and the change in the center of gravity of the system are often in conflict.



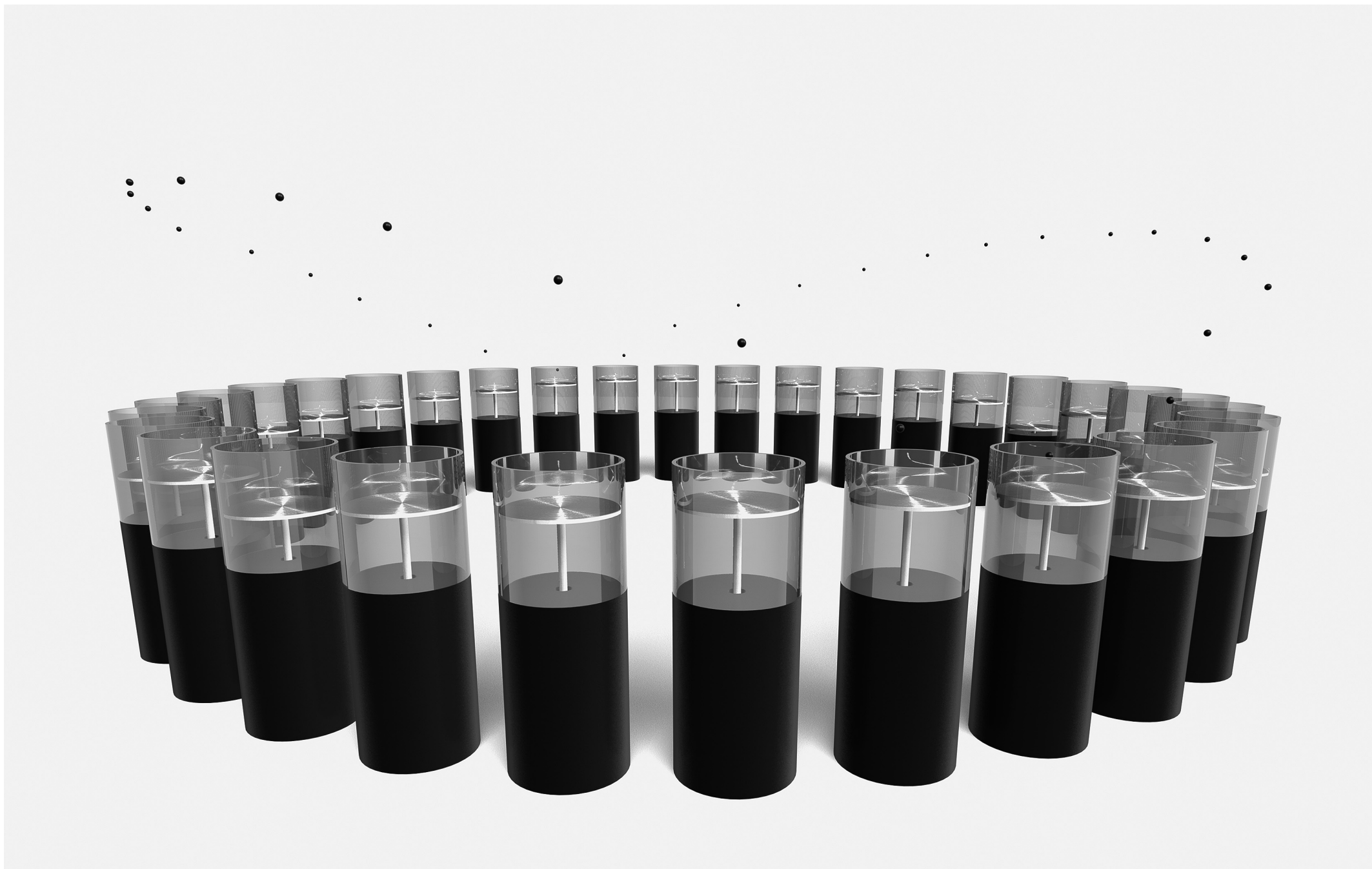
#11

This is similar to the problems that tight-rope walkers face when they adjust their balancing pole. → FIGURES #9 #10

The *Balancing Cube* has appeared in several international venues, such as the IFAC World Congress in Milan and the Festival Della Scienza in Genoa.

— Blind Juggling Machines (2008 - present)

My main collaborator on this project is PhD student Philipp Reist. Philipp is using the *Blind Juggling Machines* to explore new paradigms for controlling dynamic systems. We have shown that nonlinear systems once thought to be uncontrollable, can, in fact, be controlled by exploiting their natural dynamics, such as those found in chaotic systems. The *Blind Juggling Machines* can juggle balls without seeing them, and without catching them. Most of these devices can juggle balls without any sensory feedback, such as sound or contact; this is achieved by exploiting the dynamics of these machines to achieve stable ball trajectories. This is very much in contrast to how most human beings would perform



— Blind Juggling Machines (2008 -)

Mon principal collaborateur sur ce projet est le doctorant Philipp Reist, qui utilise les *Blind Juggling Machines* pour explorer de nouveaux paradigmes de contrôle de systèmes dynamiques. Nous avons montré que des systèmes multidimensionnels jusqu'alors jugés incontrôlables peuvent, en réalité, être contrôlés en exploitant leurs propriétés dynamiques naturelles, telles celles rencontrées dans les systèmes chaotiques. Les *Blind Juggling Machines* peuvent jongler sans voir les balles, et sans les attraper. La plupart d'entre elles, en fait, peuvent jongler sans les retours sensoriels que sont le son ou le contact ; ceci est permis par l'exploitation de la dynamique de ces machines pour conférer une trajectoire stable aux balles. Cette façon de procéder contraste avec le comportement de la plupart des humains dans les mêmes conditions : nous utilisons nos yeux pour déterminer où placer nos mains, par exemple.

La première *Blind Juggling Machine* de la série est le *Blind Juggler* ou jongleur aveugle. Il peut jongler en continu jusqu'à une hauteur de deux mètres.

Le *Swinging Juggler* ou jongleur oscillant est essentiellement un jongleur aveugle posé sur un pendule. → FIGURE #11

Le *Juggling Ensemble* consiste en l'association de 32 automates robotisés du type *Blind Juggler*, synchronisés de façon à produire des séquences sonores complexes. → FIGURE #12

Le *Cloverleaf Juggler* comprend quatre zones concaves séparées ayant la même forme parabolique que le jongleur aveugle, qui lui permettent de jongler avec quatre balles simultanément. À la différence des autres machines jongleuses, le *Cloverleaf Juggler* est doté de capteurs sensoriels sur chaque zone. Les données sont utilisées pour générer des trajectoires complexes

qu'il serait autrement impossible de réaliser sans retour sensoriel. → FIGURE #13

Le *Blind Juggler* a été présenté lors de nombreuses expositions internationales, à l'Explanatorium de San Francisco, au musée de la Communication de Berlin ou au Festival Della Scienza de Gênes. Il fait partie de la collection permanente du musée de l'Informatique à Paderborn en Allemagne. Philipp Reist a récemment fait la démonstration du Jongleur Aveugle devant un public de plusieurs centaines de personnes à Zurich Minds, la version suisse de la Conférence TED.

— Distributed Flight Array (2008 -)

Mon principal collaborateur sur ce projet est Raymond Oung, doctorant utilisant la *Blind Juggler* comme banc d'essai pour développer de nouveaux algorithmes d'auto-assemblage, d'estimation distribuée et de contrôle. Une étude sur ce travail a récemment été publiée et sélectionnée comme l'une des quatre meilleures parmi près de mille publications à la Conférence Internationale de la Robotique et de l'Automation en 2010. Tout comme le *Balancing Cube*, la *Distributed Flight Array* était au départ un exercice pratique pour un cours de design de niveau master à l'École polytechnique fédérale de Zurich.

Les modules individuels de la *Distributed Flight Array* ont une hélice qui leur permet de voler, mais le vol est complètement instable. Néanmoins, une fois assemblés, ces modules relativement simples deviennent un système sophistiqué à plusieurs hélices capable d'un vol coordonné. Pour pouvoir s'envoler, les modules doivent d'abord se « trouver » en se déplaçant sur le sol. Ils se connectent les uns aux autres en formant une matrice, et échangent des données afin de déterminer la poussée nécessaire à l'envol et au maintien de l'altitude. Ce n'est qu'à



#13

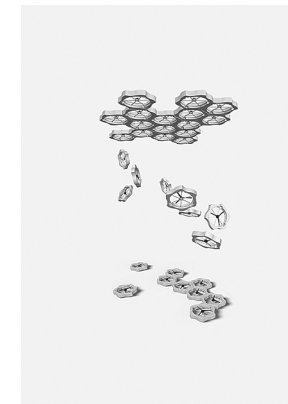
the same task: we would use our eyes to determine where to put our hands, for example. The first in the series of the *Blind Juggling Machines* is the *Blind Juggler*. It can continuously juggle at heights of up to two meters.

The *Swinging Juggler* is essentially a *Blind Juggler* on a pendulum. → FIGURE #11

The *Juggling Ensemble* consists of a team of 32 *Blind Jugglers*, synchronised to produce complex sound patterns. → FIGURE #12

The *Cloverleaf Juggler* features four separate concave areas that have the same parabolic shape as the *Blind Juggler*, allowing the simultaneous juggling of four balls. Unlike the other juggling machines, the *Cloverleaf Juggler* has contact sensors on each paddle. This information is used to generate complex trajectories that would otherwise be impossible to realise without feedback. → FIGURE #13

The *Blind Juggler* has appeared in many international venues, such as the Exploratorium in San Francisco, the Museum for Communication in Berlin, and the Festival Della Scienza in Genoa. It is in the permanent collection of the German Computer Museum in Paderborn. Philipp recently demonstrated the *Blind Juggler* to an audience of hundreds at Zurich Minds, the Swiss version of the TED Conference.

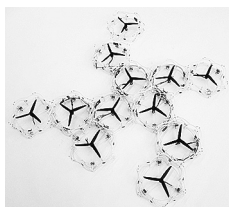


#14

— Distributed Flight Array (2008 - present)

My main collaborator on this project is PhD student Raymond Oung. Ray is using the *Distributed Flight Array* as a test-bed for developing new algorithms for self-assembly, distributed estimation, and control. A publication based on this work was recently selected as one of the top four out of one thousand papers at the 2010 International Conference on Robotics and Automation. Like the *Balancing Cube*, the *Distributed Flight Array* started as a graduate-level design class at ETH Zurich.

The individual modules of the *Distributed Flight Array* have fixed propellers that can lift them into the air, but the resulting flight is completely unstable. Joined together, however, these relatively simple modules evolve into a sophisticated multi-propeller system capable of coordinated flight. In order to take flight, the modules must first "find" each other by moving along the ground. They connect to one another to form an array, and exchange information to determine how much thrust is needed for the array to take-off and maintain level flight. It is only then, once the parts become a whole, that the array can take flight. → FIGURE #14



#15

ce stade, lorsque les parties deviennent un tout, que la matrice peut voler. → FIGURE #14

Une fois en vol, la matrice doit contrôler ses paramètres en permanence et exercer des poussées correctives pour rester stable. Si la matrice perd sa stabilité en vol, chaque module détermine individuellement la poussée nécessaire pour compenser la perturbation, en fonction de sa position dans la matrice et le mouvement de celle-ci. Les modules sont capables de se détacher au cours du vol, conduisant à un démantèlement chaotique et un retour au sol. Le processus se répète ensuite : assemblage au sol, vol coordonné, et démantèlement en vol.

Chaque module est une unité autonome comprenant une alimentation, des capteurs, un microcontrôleur et un moteur. Les données relevées par les capteurs du mécanisme sont transmises à son microcontrôleur. Celui-ci combine les données issues de son propre capteur avec celles reçues des autres éléments pour déterminer l'ordre approprié à transmettre au moteur. Une hélice fixée au moteur fournit la poussée nécessaire au vol et à la stabilisation. → FIGURE #15

— Flying Machine Arena (2007 -)

Mes collaborateurs principaux sur ce projet sont Markus Hehn, Angela Schoellig, Sergei Lupashin, Mark Müller, et Federico Augugliaro, doctorants. *Flying Machine Arena* est utilisée comme banc d'essai pour développer des algorithmes sophisti-

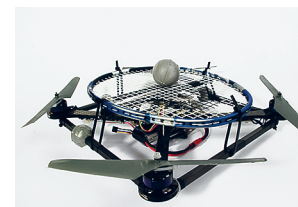


#16

qués de vol autonome pour des appareils volants. D'une dimension de 10 x 10 x 10 m, elle consiste en un système de *motion capture* de haute précision, d'un réseau de communication sans fil, et d'un logiciel spécialisé qui exécute les algorithmes d'estimation et de contrôle. *Flying Machine Arena*, ou *FMA*, a été la base du projet *Flight Assembled Architecture*. → FIGURE #16

Le système de capture de mouvements peut localiser de multiples objets dans l'espace, à une fréquence excédant 200 trames par seconde. Bien que cela semble extrêmement rapide, les objets dans l'espace peuvent se mouvoir à des vitesses dépassant 10 m/s, ce qui correspond à un déplacement de plus de 5 cm entre deux trames. En conséquence, des algorithmes d'estimation spécialisés sont utilisés pour prendre en compte explicitement la dynamique du système et prédire la position des objets à n'importe quel moment.

Ces informations sont ensuite utilisées pour déterminer les commandes à exécuter par les véhicules pour adopter le comportement désiré, par exemple s'incliner, faire une boucle, ou jouer un match de paddle-ball. La liaison sans fil transmet ces commandes aux véhicules, qui les exécutent grâce aux processeurs embarqués et à différents capteurs, tels que des gyroscopes et des accéléromètres. → FIGURES #17 #18 #19



#17

Once in flight, the array must constantly monitor itself and apply corrective thrusts to remain stable. If the array's leveled flight is disturbed, each module individually determines the amount of thrust required to correct for the disturbance based on its position in the array and the array's motion. The modules are capable of detaching in flight, resulting in a chaotic disassembly and eventual return to the ground. The process then repeats itself: assembly on the ground, coordinated flight, and disassembly in the air.

Each module is a self-contained unit with onboard power, sensors, computer and motor. Data captured from the mechanism's sensors is sent to its computer. The computer combines its own sensor data with data received from its peers to issue appropriate commands to the motor. A propeller attached to the motor provides the necessary thrust for flight and stabilization. → FIGURE #15

— Flying Machine Arena (2007 - present)

My main collaborators on this project are PhD students Markus Hehn, Angela Schoellig, Sergei Lupashin, Mark Müller, and Federico Augugliaro. The *Flying Machine Arena* is used as a test-bed for developing sophisticated algorithms for autonomous vehicle flight. Measuring 10 x 10 x 10 metres, it consists of a high-precision motion capture system, a wireless communication network, and custom software that executes algorithms for estimation and control. The *Flying*



#18



#19

Machine Arena, or *FMA*, formed the basis for *Flight Assembled Architecture*.

→ FIGURE #16

The *FMA*'s motion capture system can locate multiple objects in the space at rates exceeding 200 frames per second. While this may seem extremely fast, the objects in the space can move at speeds in excess of 10 m/s, resulting in displacements of over 5 cm between successive snapshots. As a result, custom estimation algorithms are used to explicitly take system dynamics into account and predict the state of the objects at any given time. This knowledge is used to determine what commands the vehicles should execute next to achieve the desired behavior, which for our research includes balancing poles, performing flips, or engaging in a game of paddle-ball. These commands are sent to the vehicles via wireless links, and are executed by them with the aid of onboard computers and various sensors such as rate gyros and accelerometers. → FIGURES #17 #18 #19

