

座談会

2 足歩行ロボット技術の現在：完結編

Biped robot technology now

高西 淳夫*1 梶田 秀司*2 佐野 明人*3 藤本 康孝*4
玄 相 昊*5 西 脇 光 一*6 浅野 文彦*7 杉原 知道*8*1 早稲田大学 *2 産業技術総合研究所 *3 名古屋工業大学 *4 横浜国立大学 *5 立命館大学 *6 産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター
*7 北陸先端科学技術大学院大学 *8 大阪大学Atsuo Takanishi*1, Shuuji Kajita*2, Akihito Sano*3, Yasutaka Fujimoto*4, Sang-Ho Hyon*5, Koichi Nishiwaki*6, Fumihiko Asano*7
and Tomomichi Sugihara*8*1 Waseda University *2 AIST *3 Nagoya Institute of Technology *4 Yokohama National University *5 Ritsumeikan University *6 DHRC, AIST
*7 Japan Advanced Institute of Science and Technology *8 Osaka University

1. はじめに

本稿は、日本ロボット学会誌第30巻4号 特集「2足歩行ロボット技術」に掲載された座談会「2足歩行ロボット技術の現在」の後半である。

日時： 2012年1月25日(木) 13:00~17:00

場所： 早稲田大学先端生命医科学センター (TWInS)

2階 共用会議室 A

2. 受動2足歩行

梶田 ちょっと、ここで受動歩行の話にふっちゃんいしましょうか。浅野先生、受動歩行の研究の流れについてどう思われますか？

浅野 僕は古田研に入ると同時くらいに同級生からP2のビデオを、それから一年後に古田先生からマクギア先生のビデオを見せてもらって、どちらも凄いなと感激はしつつも、一方で「なるほど良く歩いているな」と冷静に受け止めました。ただ、最初はどちらもそんなに難しいことではないような、それくらい綺麗に歩いてたからだと思うんで

すけど、実は凄く単純な原理原則がこのなかに埋まっているんじゃないかなって思いました。マクギア先生の1990年の有名な論文が出版されてからもう20年が経ちますが、何故坂道で手を離しただけでスタスタと歩きながら安定に収束していくかってことが未だに解っていないわけです。やっぱり、すごく難しい問題なんだと。現象だけなら一目見て理解できるんだけど、何故安定なのかと聞かれると誰も答えられない、そういう意味ですごく良い問題なんだと思います。

受動歩行の研究は二つの大きな知見を与えたと思います。一つは効率的に歩くにはどうすれば良いか、その手本を示したことで、もう一つは2足歩行は何もなくても本質的には安定な運動だということを知ってくれたことです。この二つはすごく大きいと思います。大学の講義で2足歩行がどこまで進んだかという話を学生たちにしたりするんですけど、最近ではZMP規範とリミットサイクル規範に二極化しつつあって、ZMPはもちろんまっとうな技術だし、受動歩行も効率的な歩行を実現する意味で素晴らしい技術だし、どちらも捨てがたい、両方の長を融合したら更に良いものが出来るんだけど、そんな風に説明しています。

僕が古田研の学生だった頃はまだ受動歩行が流行り始めで、今ホンダにいらっしゃるゴスワミ先生[†]がコンパス歩容で分岐現象やカオスの挙動が現れることを1996年に発表された直後でした。あの頃から自然な歩行とカオスの関係を探ろうとする研究が活発化して、日本でも大須賀先生や佐野先生が精力的に研究されていました。僕も古田先生から受動歩行における分岐現象の必要性を解明できないかと言われました。当時の自分には何も結果が出せませんでした。現在でも変わらず見通しの立たない難問として残されたままです。ただ、受動歩行の研究を通して、カオスも重要なんでしょうが、なぜ歩けるのか、歩行の一番の要は何かってことを知りたいわけですよね。ヒューマノイドの

原稿受付

キーワード: biped robot, ZMP, passive-dynamic walking, limit cycle walking

*1 東京都新宿区若松町 2-2

*2 茨城県つくば市梅園 1-1-1

*3 愛知県名古屋市昭和区御器所町

*4 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

*5 滋賀県草津市野路東 1-1-1

*6 東京都江東区青梅 2-3-26

*7 石川県能美市旭台 1-1

*8 大阪府吹田市山田丘 2-1

*1-2-2, Wakamatsu-cho, Shinjuku-ku, Tokyo

*2-1-1, Umezono, Tsukuba

*3 Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi

*4 79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama

*5 1-1-1, Noji-Higashi, Kusatsu-shi, Shiga

*6 2-32-26, Aomi, Koto-ku, Tokyo

*7 1-1, Asahidai, Nomi, Ishikawa

*8 2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka

[†]Ambarish Goswami, 現在 Honda Research Institute USA, Principal Scientist



図1 早稲田大学先端生命医科学センターにて。前列左より、梶田、高西、佐野。後列左より、玄、西脇、浅野、藤本、杉原。

ように自由度が大きいものを考えることも勿論重要だと思うんですけど、割り箸で作るような簡単な玩具でも歩くんだけどもその玩具が安定に歩く理由さえ説明できないというのは科学者として情けないと感じることがあります。ですから、まず単純なものに潜む原理を深く知ることです。2足歩行の本質 = 要は何かということをしかり理解したいですね。

自分は学生たちに、ZMP 規範の制御は歩行系を床面から生えているマニピュレータとして扱うための技術なんだよ、と端的に説明することがあります。それに対して、受動歩行 = リミットサイクルは床面に固定されていない、歩行系に内在する特有のダイナミクスを上手く使って歩いているんだよ、でもその要が何であるかはまだあまり良く分かっていないんだよ、ゴメンって言って終わるんですけども…。これまで多くの人が受動歩行を手掛かりに歩行の要は何であるかを考えてきましたが、依然として難攻不落な状態であるという感じです。ただ、受動歩行を起点として色々な制御方法や新しい技術も作られてきたし、その意味では ZMP の対抗馬として一つの分野が築かれているんじゃないかなと思います。

高西 受動歩行って言うと、昔のおもちゃで、糸に重りをつけて歩く、あれもそうですね。さっきサイエンティフィックには大体出来たって言っちゃいましたけれど、今みたいな話はもっと展開するんじゃないかと思っています。というのは、人や生物のモビリティを科学する道具としてのロボティクスの存在はあると思います。加藤先生がずっと昔から言われていた事です。

そういう意味で、今 FP7 というヨーロッパのプロジェクトに参加してまして、RoboSoM という名前がついた

プロジェクト[†]なんですけど、始まって2年くらい、あと1年くらいで終わるんですが、アラン・ベルトース^{††}という”The Brains Sense of Movement”という有名な本を書いた脳科学者で、ノーベル賞の候補にもなってる先生なんですけど、その人は脳の運動関係の事を長年やられている先生です。目や三半規管とか、それに対する体のリフレックスとか。その仮説を検証するのに今までヒトを使っていたんですが、ご存じのようにヨーロッパだけでなく世界中で人権問題が広がって、それを2足ロボットを使って立証してほしいという枠組みで今やっています。それにうちの WABIAN の技術を使おうと。日本から向こうに持ってゆくのがすごく大変なので、早稲田と長い間共同研究をやっているイタリアのパオロ・ダリオさんのところに技術移転し、さらにヨーロッパの中でもローカルにコラボレーションして仮説を立証する計画です。それで、人の運動というのは目を安定化するようにすべてが起きていると、歩行だけじゃなくて、激しい運動とかも含めて。そういう視点で2足ロボットをもう一回見直してどういうメリットがあるか考えられないかと。今、ロボットのコントローラのほうをそういう視点で書き換えるというのを今一生懸命やっています。ただビジョンは我々は得意じゃないので、ポルトガルの IST の先生と一緒に進めています。

よく分からないんですが、人の2足歩行ってのはカオスなんですか？歩幅とか歩行周期とか計測すると？

浅野 又聞きですけど、基本的には一周期らしいですね…。だけど、100m を 10 秒で走するようなアスリートの高速走行はカオス的だと言っている先生もいるらしいです。

[†]<http://www.robosom.eu>

^{††}Alain Berthoz, Professor Collège de France, Physiology of Perception and Action

色々な話があって。

高西 個人的な事で申し訳ないんですが、一年くらい前に心臓の手術をしたんですよ。今は大丈夫なんですが、その時調べただけで、拍動ってカオスっていうか乱数になるのが普通で、心拍が揃い始めたら間違いなく心臓の病気がらしいんです。で、医者が心電図を見て注目するのがそこらしいです。

梶田 ってことは、健康な歩行は周期にばらつきがあったほうがいいのか？(一同笑)

高西 自然に、無意識に歩かせたらどうなるんだろうと思いつつ、まだ実験もしていないんですが、受動歩行とかやられているとどうかと。人と比べたいと思いませんか？

浅野 比べたいですね。でも、講演会で僕の話聞いてくれたお医者さんから、そんなコンパスとか簡単な剛体モデルで人間の歩行は説明できないよ、みたいな批判を受けたこともあります。やはり剛体モデルには限界があって、柔らかさをモデルに入れていかないと無理なのかな、って気持ちはあります。

高西 でも、二重振り子からもうカオスが出るわけで。カオスの面白さって、ものすごくクリスプなモデルがあるにもかかわらず、現象だけ見るとランダムに見えるってところですね。その面白さが生体につながる気がします。

浅野 人間の歩行を計測して一周期だと言っているのも、もしかしたらカオス的な挙動をノイズだと解釈して「基本的には一周期」と言っているのかも知れません。

高西 それはありますよ。我々のように工学を背景にしてない人たちっていうのは大体統計的なツールを使ってやるんだ。あれ、基本は線形モデルをベースにしてるじゃないですか。慣性主軸とかいろんなものがね。その視点であるかぎり、何かわけのわからないものであると、複雑性の側に帰結させる傾向があると思う。我々はそうじゃなくて、シンプルな中にも実は複雑に見えるものがたくさんあるということが、実機を作ってわかるわけです。

佐野 ロボットの動きもどんどん人に近づいてきているので、今後わかり易い説明の仕方でもっと情報発信してゆくと、歩行リハに携っている理学療法士さんとか人の歩行でお仕事されている人々にも耳に止めてもらえ、ロボット研究から見出した歩行のメカニズムの理解がもう少し深まり、何らかの形で活用してもらえんのかなって感じです。大学もこれから一般の社会にどう技術を説明してゆくか、そこをかなりしっかりと考えていかないといけない気がするんですけど。

3. 受動2足歩行の原理について

梶田 ちょっと、でも、さっきのね、浅野先生の話の中でパッシブ・ウォークの原理が未だに理解できないっておっしゃる気持ちが、僕には納得がいけないんですけど。パッ

シブ・ウォークの安定性自体は、ポアンカレマップの固有値が単位円の中に入っていれば安定だ、ということで、それで理解したと言っはいけないんですか？

浅野 サイエンスとして説明しなきゃいけないのは、「単位円の中に入ってますね」じゃなくて、「どういう理由で入るんですか？」です。ある物理パラメータを設定して適当な初期値を与えたら、歩きながら自然に安定化して行って、固有値が単位円内に入るわけだけど、違うパラメータを与えて違う初期値からスタートさせると発散したりするわけです。つまり、設定したパラメータに応じて固有値が単位円内に入ったり入らなかったりするんです。これまでの殆どの研究は、安定な歩行を見て、その固有値を調べて、ああ単位円に入っているねって説明をしているだけなんです。それは当たり前ですよ。安定な歩容を調べているんだから。

佐野 受動歩行を研究しているものとしては、何故それが安定になり得るのかとか、安定になり得るメカニズムとか、もう少し奥深いところをやりたいなって思いがあって、浅野先生もたくさん論文を書かれているんですけど、なかなかそれがまだ自分の中でじっくりこないとてのが個々の先生の思いなんじゃないかと思えます。そこで、たとえば、もっと純粹に数理的にきれいな式でバシッと示すとか、もっと違う表現方法を持ち込めないか、研究者仲間いろいろ議論しています。また、我々は得られた知見を使ってロボットを作るとちゃんと歩ける、ということで示したりしています。今、わりとそういうステージに来ているのではないかと思っています。

梶田 ところで、杉原先生からつつこみが欲しいんですけど。

杉原 よろしいんですか(一同笑)。何故安定かを定性的に説明したいという事だと思うんですが、それがまだなされてない、とされる理由が実はまだちょっと分かっていません。重力による位置エネルギーが運動エネルギーに変わるわけですが、運動エネルギーが過剰になった場合、遊脚がより大きく前に出て、着地したときの衝突エネルギーがより大きくなって減速する、運動エネルギーが不足した場合、それと逆のことが起こる、みたいな説明ではダメなんですか？つまり、重力による運動エネルギー供給と衝突による運動エネルギー散逸の反復が、ワットの蒸気機関の遠心调速機と同じような自然な安定化フィードバック構造を持っている、というふうに僕は理解しているんですが、その理解では不十分なんですか？

浅野 リムレスホイールの場合、スポーク車輪がガタンガタンと言いつつ安定に収束していきますよね。あれは一定の割合でエネルギーが増えて、また一定の割合でエネルギーが減って、その繰り返しで収束しますよって運動エネルギーの漸化式を使えば一発で説明できるんですけど、受動歩行の難しさは、何故股角度を一定に拘束しないのに

歩きながら一定になっていくのかなってところにあるわけです(梶田:遊脚がフリーのモデルですね?)はい,どうして自分で歩きながらバランスをとるように上手く動きを持っていけるのかな,ってところが分からないわけです.

高西 矢状面内だけの運動でとらえると,必ず...,角運動量でも同じですね,要するに足先が路面にぶつかって運動量が少なくなると必ず最後はある一定状態に.たぶんそう言うのは佐野先生がやってたから.昔の2足ロボットって矢状面だけの運動だけに限って,前頭面は拘束させたりするのがすごく多かった.でもそれは,たぶん矢状面の中だけに2足歩行の本質があるから,そこでやればいいんだってという理解があったんじゃないかと思うんですけどね.で,加藤先生はそれだめだって言ったんですよ.だから僕はそっちのルートに一切行けなくて.結局今でも思うのは矢状面の話よりもむしろ,前頭面,前額面というか,そういう部分と,矢状面の運動が融合して実際の三次元の動きが起きているんです.そういう話ってあるんですか?受動歩行で.

佐野 あんまりないですね.2次元のほうが多いです.ヒューマノイドっぽいものに向かうと,メカ作りに主眼が置かれ,純粋に受動歩行を3Dでっていうのは割と少ないですね.

梶田 でも,コーネル大のコリンズがやってますよね.

佐野 もちろん,3Dのロボットは作られています,高西先生の言われるような本質的なものが三次元的な拳動の中で見られるとか,生まれてくるっていう視点はあまりないと思います.二次元とは全然違うものを見るくらいの気持ちで次元を扱うところまでには至っていない気がします.

浅野 まずは究極的に簡略化したシンプルな二次元のモデルで,何故安定なのかを説明したいと思うのですが,それすらできないわけですね.だからいつまで経っても三次元に進めないなっていうのが正直なところです.

佐野 さっき杉原先生が言われたように,安定に動いているので,これがこうなっていないと安定にならない,サイクリックにならない,ある種のフィードバックがかかっている,という説明の仕方はいろいろできるとは思います.しかし,何故そうなるかっていうところが,もう少し違う切り口でスパッと言えるんじゃないかって,皆思っているんですけど.

杉原 違う切り口というのは何ですか?

佐野 我々は平衡点がどう生成されるのか,どう安定化されるのかを論文で出しているんですけども,それが杉原先生の説明と反対のような結果と言うわけではなくて,結果的に同じような表現もできるのかも知れません.

藤本 受動歩行で遊脚の歩幅が勾配で勝手に決まりますよね.確かにおっしゃるように後付の説明は可能だと思うんですけど,なんでそうなるのかと言われればそうかと思

います.それで,支持脚から見たときの重心の運動,もしくはZMPから見た時の重心の運動というのは受動歩行もZMPベースの歩行も本質的には同じですね.で,ZMPベースの歩行で遊脚(軌道)を設計するときは結構いろいろ自分で軌道を作りこむなりして,すごく悩ましいところがあるんですけど,受動歩行ってのはそこが勝手に決まっていますよね.その辺が将来的に佐野先生がおっしゃったようにZMPベースの歩行と受動歩行ベースの歩行がどっかで合致すると非常にいいかなと,お話を聞いていて思いました.

佐野 受動歩行は基本的に着地直後のところ(状態)で,スパッと切っただけで見ているんですけど,途中の脚の軌道ってのはあるわけですね.脚のフリー運動でうまくしないと,途中でつまづいたりするので,安定云々という以前に転倒してしまうわけですね.だから受動歩行と言えども脚のフリー運動が重要になります.先生がおっしゃるように,それが自然と行われるんですけども,機構的にいろんな拘束をつけたりすると,例えば円弧足ってのは典型的なんですけど,ずいぶん変わってきたりします.だから,ダイナミクスベースでどうやってそれを作り出して行くかってところに面白みがあります.膝がカクンと折れるのは受動歩行の典型的な転倒例なんですけど,膝をロックしてしまえばいいんじゃないかという話もあります.しかしこれをしてしまうと,その段階で膝が折れるメカニズムに目を向けなくなる.折れやすいのはいつの時期だとか,ダイナミクスをどう調整すると膝が折れ難くなるのかとか,そういうのがわかってくるとうれしいことがいろいろ出てくると思うんです.PETMANの話がいずれ出ると思いますけど,PETMANは本当に歩きたい歩容で歩いているのかどうか,ダイナミクスのですね,そんな話を昨日ちょっとしました.受動歩行の場合は,そいつが持っているダイナミクスで歩きたいように歩いているって形なので,それを最大限活かしつつさらにロバスタ性を高めたりするのが望ましいと思います.いずれZMP規範での遊脚軌道の参考になったら面白いかなと思います.

浅野 受動歩行とZMPの融合という話をされましたが,受動歩行に凄く期待している人でZMPを好きじゃない人,「足首がフリーな2足歩行こそ真の2足歩行」みたいな,そういう主義主張を持っている人がいますね(笑).自分が最初に提案した「仮想受動歩行」っていうのはフルアクチュエートでないとできません.足首に小さな駆動力が必要で,これは脚が1mあったら親指くらいの大きさのフットで足りるんだけど,それで高効率な歩行が実現できても,やっぱり足首を駆動するとZMPの問題が付随して必ず発生するので,結局ZMPを気にして歩いている,そんな受動歩行と言えない,ZMPを気にしない2足歩行こそ目標にすべきだ」みたいな批判を受けた苦い経験があります.

梶田 ポイントコンタクトでなきゃいけないのか、円弧足は OK なのか、その人はどっちだったんですか？

浅野 足先が尖っていた方が不整地適応に有利な筈だと、ちょっとしたフットでも、駆動力があると不整地で何か障害物を踏んだ時に大変なことになる、ZMP 規範では足裏を床面にフィットさせた上で足首の駆動力を出そうとするから石ころを踏んだ時に厄介な事になる、という主張です。

西脇 無限に小さなポイントコンタクトでは、床が壊れてしまいますよね… というのは置いていて、ZMP 規範という言葉がまあ好きか好きじゃないかは置いていて、結局、そういうふうな歩かせ方をしてみると一歩の中で足の中で使える領域を使ってトルクを出して重心の速度をコントロールするか、次の一步の着地の位置を変えるか、タイミングを変えるかで、まあ、結果起こることは重心の運動という観点から見れば変わらないのかなと思う節もあります。で、フルサイズのヒューマノイドをやっていると、まずタイミングを変えるのは矢状面と前額面の運動の混合の問題があって、まあ、もともと分離して考えているからという理由はありますけども、なかなか大変だなと。で、着地位置を変えるのはとても有効で少し簡単ですが、ある意味でフルサイズのヒューマノイドで足を振るのは意外と大きな効果を生む時もある… というのを悩むことがあります。もう一つは、将来の話として、藤本先生がおっしゃったように遊脚は悩みの種で、受動歩行みたいな規範があって関節角レベルで滑らかな軌道をとるのが正しくて、足の先の位置の軌道が滑らかったのはなんら意味を持たないとは思いますが、特にバランスを取るために着地の位置を変えたいとか、着地のタイミングを変えたいとか、不整地適応するために足は真上から降ろしたいかと思いはじめると、最後の瞬間に時々刻々計画が変わる腰の位置と足の位置の関係がどうしても違ってきて、途中まで関節角レベルで軌道を滑らかにしようと頑張っていたのに、最後の瞬間に過大な加速度が必要だったりして、きれいじゃないなど。それはたぶん、着地位置をとっても厳密に制御したがっているという理由もあるんですけど、そんなことを考えながら ZMP ベースの歩行をやっています。

佐野 梶田さんよく DynamicWalking のワークショップに行かれていますよね。ああいうのに参加しているというのは受動的な歩行にも興味があって、融合しやすい立場にあるんじゃないかと思うんですが。

梶田 DynamicWalking というのは、Science に受動歩行の論文を出した、コーネル、MIT とオランダのデルフト工科大の先生たちが中心になってパッシブ・ウォークの研究者たちが集まっているワークショップです。この中だと、正義のジュダイ騎士であるパッシブ・ウォークの人たちに対して、僕は ZMP というダークサイドに落ちたダースベイダーのかな、という気持ちで最初顔を出しました(笑)。

ただ、行って見て思ったのは、まさに佐野先生がおっしゃったように両方の融合ということを非常に真剣に考えているという印象でした。ただ、2つをどう結び付ければよいか、というとハッキリとした答えは、まだ出ていないと思いますね…。あと思ったのは、海外でパッシブ・ウォークをやっている研究者の主流はむしろセミ・パッシブ・ウォークに行ってますよね。アクチュエータを足して平面を歩けるようにするというので、膝にもモータをつけることに躊躇なしにやってくと、浅野先生もこのところモータを付けてやられていますが、そっちの方向に行くことに対して特に異論はないですか？

4. 歩行の効率

浅野 それは当然だと思います。ちょっと話がズレますが、ZMP 規範の歩行制御法は効率が悪いという人が少なからず居ますよね。そういう人にセッションが終わった後、何を根拠に効率が悪いと話されたんですか？と聞くと、「みんながそう言っているから」という回答だったり、実際のところは、あまり根拠が無いようですね。

梶田 Science の論文の中では、ASIMO のデータをもとにして、移動仕事率が大体 10 倍くらい悪いと書いてあるので、うちのロボットに関して計算してみたんですよ。そうしたら、オーダー的にほぼ同じ数値が出たので、効率が悪いのは事実としてあります。

浅野 ただ、フルアクチュエートでも効率の計算式がちゃんとするので、別に足首を駆動するかどうかというのは効率には直接的に関係無いわけですよ。そのへんを理解しないで、ただ ZMP を批判している人が結構多いなというのが気になります。あと ASIMO は上半身があるので、それを支えるトルクが凄く大きいから、受動歩行と比べて ASIMO がダメだというのは可哀そうですね(一同笑)。

高西 膝を曲げているから、いつも体重を支えるトルクのほうで大半とられてしまっているから、比較がちょっと良くないってことですね。

浅野 違うものを比べて違う効率になるのは当然ですね。

佐野 受動歩行対 ZMP の話になっちゃってますが、最近フルボディのロボットがいろいろなところで進歩しているので、受動歩行研究でもそこはすごく意識していますね。東大のチームや早稲田のチームから次々と新しいロボットが出ていって、受動歩行もあんまりサイエンティフィックなところに留まりすぎても駄目なんじゃないかって思いもあります。そういう意味で今はコミュニティが狭すぎますが、受動歩行と ZMP 規範のモードチェンジみたいな話が出てきているので、今後もっと広がっていくかもしれません。

梶田 玄さん、何かコメントをいただけますか？

玄 受動歩行とフルアクチュエート、特に位置制御の優劣を比較するとき、アンフェアという話が出ましたが僕も同じ考えです。受動歩行の場合は無入力で消費エネルギー0、それに対して、フルアクチュエーティッドのロボット、特に位置制御のやつは自由運動があるとすれば、関節が全部固まって全体が倒れこむ、それぐらいしかないですね。それでは、歩行できないので、わざわざアクチュエータを動かして軌道追従させるじゃないですか。同じ土俵にまず立たせて比較するのだったらいいんですけど、その時にエネルギー効率を評価関数として最適制御を導出すると、それでフルアクチュエートのロボットが一番自分の効率のいい歩行パターンが出てきて、実際に消費エネルギーが0になる。その時初めてパッシブ・ウォークとそもそのフェアな比較ができるんじゃないかと思います。

梶田 フルアクチュエートのロボットを制御次第で消費エネルギーを0にすることができる可能性があるということですか？

玄 例えばトルク制御のロボットがあったとしてトルクを0にする。それであたかもパッシブ・ウォークのように歩くと。一番簡単な説明でいえば、それはパッシブ・ウォークですよ。結局、エネルギー効率だけを考えると多分それしか出てこないですよ。で、安定性とか加味してゆくとまた違う比較が必要なんじゃないですかね。

梶田 原理的にはあり得ますよね。ダイレクトドライブの歩行ロボットを作って、モードによって完全にパッシブに動かせれば、アクティブにも動くというのであれば、どちらのサイドにも非常に説得力のあるものになる気がします。

藤本 今おっしゃった評価関数を消費エネルギーとして最適制御問題として定式化して解くというのをやってみたことがあります。問題としては次数も大きくて解きにくい問題ですが、力技で答えはなんか出るんですね。ただ、そうやって軌道を求める手法っていうのはあまり美しくなかったんですね。途中で制約条件とか目的関数とかがすごく簡単になって、そこから今まで分からなかった知見が見えたってことはなかった気がします。結果として出てきた軌道が受動歩行と似たものになるかもしれませんが、なかなか研究の手法として最適制御をダイレクトに使う私の方法ではあまりきれいにゆきませんでした。ただ、方向としては何となくいい気がするので、何か違う最適化の方法だとか、もうちょっとショートカットできるような何かがあると、すごく面白いと思います。

玄 そうですね。受動歩行が示すべきなのは、まさにそういった手がかりだと思いますね。そういった、多次元の最適化問題を解くために必要な、単なるエネルギー評価関数だけじゃない、何か違う別のもの。それを受動歩行のようなシステムで示してもらえれば、また計算が早くなるとか、そういうのがあると僕は面白いかなと思ってるんです

けど。

佐野 さっきの「何で安定か？」という疑問だけに答えようとすると非常に狭くなってしまいますので、藤本先生や玄先生の言われるような手がかりを受け渡せれば、全然違ってくるんじゃないかなと思います。こういう場（座談会）も含めて研究者同士のコミュニケーションが図れると意外に接点が生まれて、一気に研究が進むんじゃないでしょうか。

高西 今の話でみんな結構、問題が共有できたような気がしますね。

（雑談、休憩）

5. ロボットのハードウェア

梶田 後半始めさせていただきます。前半は制御的な話が多かったので、メカ的な話をしたいと思います。ロボットのハードウェアを作るうえでの苦労話とか、今後必要なデバイス、センサ、アクチュエータのあたりにいろいろ話をふっていききたいと思います。再び高西先生から口火をきっていただけますか？

高西 うちの場合は大学の中で基本は作っているもので、今製造業でも世界的なメーカーがライバルなわけで、相当大きなハンディがあって大変です。玄さんがやっていたころと、一番違うのは WABIAN2 からはかなり高度な三次元の CAD が使える、しかも有限要素法解析のモジュールとかもあって。最後は試作をいくつかしないといけないんですが、事前にある程度たわみとかが予想できる、三次元的な配置をコンピュータ上でチェックしながらできるようになったっていうのは、ここ10年くらいですかね。愛知万博のちょっと前くらい、2003年とか4年くらいかな。たぶん、それはうちだけじゃなくて、ほかのところも、東大とか産総研なんかもっと前から、たぶん予算も相当たくさんあったろうし、使われてたと思いますが、それが大学の学生程度でも使えるようになったっていうのはすごく大きいと思いますね。

それと、こういう研究でそれなりに長くやっていると、いろんなパーツメーカーがちょっと試してもらえませんか？と。よくあるのは大企業とやっていて最後の組み立て段階で使ってもらっていると。そこで悩ましいのは詳細な情報のフィードバックがないって言うんですよ。結局は企業秘密になるわけじゃないですか。ロボットみたいに他の部品とかいろいろ組み立ってお互いに相互干渉があるようなシステムなので、どこが細かい原因でこうなったのか、ただ歩いた歩かないとかで、どこを改良したらいいのかわからないわけですよ。でも大学だったらニュートラルな組織ですから、卒論に感謝状をちょっとかいてお礼するとかね、共同研究みたいなものになっていけば、かなり詳細なレポートを出すわけで、企業にとってみれば自分たちの部品をテストプラットフォームとしての2足ロボットがあると。

2足ロボットがマニピュレータと違うのは、あるときはマニピュレータと同じで遊脚状態だけど、あるときは全体重を支えなきゃいけないわけで、普通のマニピュレータの部品の性能とか強度ではできませんよね。アクチュエータも同じです。そういう意味で、ここ10年くらいは、そういうところで協力をしてくれる企業さんが出てきて、ありがたいなと、これからもそういう関係を続けていければいいと思います。それと、委託とか共同研究の契約をしている企業の理解がいきますけど、年間三回中間発表会といって、卒論・修論を全部集めて丸一日かけて発表会をやっているんですけど、それはすでに契約をしているところの理解が出れば、そういうところの人たちも参加できるんですね。そうすると企業内のテーマだけじゃなく、他のところも聞ける。もちろん、それを外でしゃべってもらっちゃ困るんですけど、それは了解を得てということで。そういう意味で大学独特の立場がうまくできるような社会、特に技術分野でハードをどうやって作ってゆかという関係ができるようになったのが、非常にありがたいなと思っていますね。

あと、部品そのもので、これが欲しい、あれが欲しいって言ったら際限がなくなると思うんですけど、ただ今すごく悩ましいのが、さっき浅野先生でしたか、柔らかい材料に歩行の本質があるんじゃないかっていう。僕なんかもうそういうのが出来ればいいなと。つまり、今2足ロボットを設計しようとする、どうしても剛性のことを気にしますよね。やっぱり剛性を上げると再現率も高いし、経験的にちゃんと歩くようになってくると、どうしてもそっち側にゆくんだけども、でも、生体はこんなに固くないよな、といつも思いながら…。ただ、すぐにはそれがうまく実現できないから、しかも修論ってのは一年以内でキリつけないといけないし、そこらへんが一番悩ましいところですね。

あとアクチュエータももちろん。どうしても、電磁式を使う限り、パワーを稼ごうとして軽くしようとしたら、どうしても回転数側でかせぐほうこうになっちゃうし、何とかならないのかと思いますね。

あとセンサは最近良くなってきていると思うのはMEMS関係のいろんな姿勢センサがいいのが出てきていて、たまたま協力してくれる半導体メーカーがあって、今後はもっと多く導入できてゆけばいいですね。逆に、感覚器の数を人間とヒューマノイドを比べたら何桁も違いますよね。こういうことも、重要なことではないかという気が最近しています。

2足ロボットにまだ直接つながっていませんが、この研究所でやっている研究テーマの一つとして、医療従事者のトレーニングをするためのヒューマノイドというのを開発しています。それは、医療用のロボットって日本ではほとんど認可がされないんですよ。企業だと最低でも10年待たないといけないんで投資が回収できないから、ど

今撤退しているんですね。ところが、医療従事者の教育に関しては薬事法ってまったく関係ないんです。しかも安全性が少々悪くても、その人達のトレーニングのスキルが足りないので怪我をしたっていうのは訴える根拠にならないんですね。例えば手術をするときに、針かけと糸の結びを0点から100点まで点数評価するシステムをウチで開発し、ある会社が販売しています。その先は今「気管挿管」と言うトレーニングをするための上半身のヒューマノイドとか。こういうところの技術っていうのは軟素材を使いこなさないと。要するにこれから外科医になるとか麻酔科医になる人達はいかにそこで臨場感をもってトレーニングをするか。今まではただの人形を使って、いい先生が横についていければいいんだけど、そういう先生ってみんな手術朝から晩までして忙しいから、でも、自分でやっつけて言われて良くわからないんですよ。本当にうまくなったか分からないまま医者になるっていうんですね。しかも国家試験は筆記試験だけです。それで心臓外科医、脳外科医になれるという恐ろしいシステムだと思いがながら（一同笑）。だからそういう意味での技術を役立てるところに軟素材が入ってきたので、これをきっかけに何とか2足歩行のところでもそういうアイデアや技術が入ってゆけないかなと思っています。

梶田 ありがとうございます。ちょっとセンサの話は後にして、アクチュエータと言えば、今藤本先生のところで今、非常に面白いものを作られていると思うんですけど、そのあたりの状況をお願いいたします。

藤本 従来ロボットでモータを使おうとすると、どうしてもパワーをかせぐために高回転型にして減速して使うので、バックドライバリティの問題が出てくるわけですね。私のところでやっているのは、スクリュー型の構造にしてあげて、らせん形状に固定子と可動子を設けまして、ボールねじの動きを全部電磁モータでやってしまうと。そのとき、機械的に接触する部分はシャフトを支持している部分だけになりますので、摩擦が小さくてDDに近いものができるということでやっています。ただ、直動方式になってしまうので駆動に近い形のマシンになるんですけども、今はそういう下肢のロボットを作ってこれから実験をするという段階ですね。アクチュエータ単体では磁気的に浮上させた状態での制御ができていまして、通常のリニアモータよりもかなり大きな力が出せることはわかっています。

高西 人サイズの2足ロボットに使えるんですか？

藤本 はいそうです。ただ、減速機付モータ、もしくはリード長の小さいボールねじとモータを組み合わせたケースと比べると、力はそこまで出ないですね。ですから、ちょっと非力な2足歩行ロボットということになるんですけども、これでどこまでできるかというのをトライしようと思っています。ただ、直動型ということであれば油圧

という選択肢も出てくるので、そのへんのメリットデメリットの比較もできるといいなと思います。

高西 油圧は玄先生ですね。

梶田 最近油圧でパワフルなものをやられているのは玄先生ですよ。

玄 SARCOS製のロボットのことでですね。あれはATR脳情報研究所の川人所長が統括されたJSTの国際共同研究「計算脳プロジェクト」の中で開発されたもので、SARCOS社としては初の2足歩行型ヒューマノイドロボットの試作機です。私は現在ミュンヘンにおられるゴードン・チェン博士が率いるグループの中で、力制御をベースとした姿勢制御や歩行制御を研究しました。その前はレイバート先生のような油圧跳躍ロボットを作っていました。これは国産です。それで、最初に油圧のデメリットからゆくと、油圧は効率が悪いですね。やはり摩擦がどうしても大きいのでそれを打ち消すくらいの出力が無駄に必要とされると言うことと、小型で搭載可能なバルブというとサーボバルブしかないですね。サーボバルブというのは漏れがあるので、何もしてなくてもエネルギーが熱となって無駄に捨てられるという、本当に効率が悪いアクチュエータなんです。だから、ポンプを搭載しようとしたときに、この問題が顕著に出てきてなかなか難しいです。米軍だとガソリンエンジンを使ったものがいろいろ最近出ていますけども、あれくらい思い切ったことをやらないと油圧で自立型というのはちょっと難しい。デメリットはそこだけですね。

メリットはメカが丈夫ということですね。ちょっとやそつとじゃこわれない。そこは非常に使いやすいシステムだと思います。もちろん、配管とか最初に組み上げるところがちょっと大変ですが、一旦組み上がれば、漏れだけを気を付ければ、ほとんどメンテナンスは必要ありません。

高西 圧力は何気圧くらいですか？

玄 圧力はその時によっていろいろ変えますけども、ATRのSARCOSのロボットは前のDBが4MPa（39気圧）、今のCB-iが21MPa（207気圧）です。

梶田 外部の油圧源はどれくらいのサイズなんですか？

玄 50関節のうち、油圧が36関節あるんですけど、それに全部バルブがついているので、バルブ一つがどれだけの流量を必要とするか足し算で決めるんですが、それで7kWくらい。物理的な大きさはタンクを含めて小型冷蔵庫くらいですね。

高西 10馬力弱くらいですね。

玄 そうですね。ただ、そのうちの何kWかは何もなくても熱になって奪われるのが油圧の宿命です。ただ、最近では油圧のシステムがどんどん改良されていて、アクチュエータ一つに小型のポンプをつけて、それで必要とされるだけその場でモータを回すというシステムになりつつあります。

梶田 それは昔高西先生がWL-10RDで使われたシステムに似ていますね。

高西 RSA(Rotary Servo Actuator)ですか。あれはね、エネルギー源とサーボバルブの一体化ではなくて、フィードバック制御機構と油圧バルブの一体化なんです。RSAっていうのは、低トルクのモータで位置決め制御するとそれが、パワーブーストされて出力軸がまわるという、当時は三菱金属が特許をもっていて、それを作ってもらって2足ロボットに使ったのがそこらだと思います。

梶田 万博(1985年のつくば科学博)で歩いていたのもそれですか？

高西 そちらは日立が作ったので、サーボバルブと油圧を組み合わせた普通のアクチュエータです。2足歩行ロボットの制御はRSAを使ってWL-10シリーズでやっていて、それを日立の機体に載せ替えるという作業を万博の前までやっていました。万博が終わった後は、上半身に重りのついた機体で、そっちは日立と同じようなサーボバルブとロータリアクチュエータを使った構成でした。

たぶんね、ネオジウム磁石のおかげでここ20年くらいでモータの性能ってすごい上がっているでしょ。あれが大きかったんじゃないですかね。だから当時はそういうのがなくて、なかなか(モータのみによる)実現が難しかったというのがありますね。

梶田 玄さん、最近の油圧のロボットで危ない思いをされたこととかないですか？

玄 いえ、そこは気を付けていまして、事故は一度もないです。確かに敷居は高いと思うんですよ。だから、やろうと思うと、買ってきたものを使うというんだったら怖いんですね。やはり、アクチュエータ本からちゃんとクリアしてやらないと、大学ではちょっと危ないんじゃないですかね。配管をちょっと忘れただけでも、怪我をするということはたぶんないと思うんですけど、油がバーッと散ったりすることはあります。

西脇 制御の観点からみて、サーボモータに比べてどうなんですか？

玄 普通に速度制御をするのであれば、かなり簡単に精度を出せますね。モータの回転数制御と同じ感覚で使えますので。だから、位置決めを使うのであれば普通に簡単なPDとか組んでできちゃいます。ただ、力制御になるとちょっと難しいですね。トルクをフィードバックしてモータを回すのか、それとも力をフィードバックしてサーボ弁を動かすのか二通りありますけども、今の段階ではモータをうまく制御して力を高精度に追従させるのは難しいかなという気がします。HST[†]を使えばバックドライブができる、比較的

[†]Hydraulic Static Transmission 油圧ポンプと油圧モータの組合せによる変速機。

高減速比の変速機が得られますが、重量はなかなか軽くなりません。また、摩擦によるロスはやはり甚大で、高応答とするためにはやはり力や圧力のフィードバックが必須となります。

梶田 玄さんはCB-iを使ってトルク制御を実現されていますよね。

玄 あれはサーボ弁でやっています。サーボ弁は応答性が良いので、モータとポンプを経由した制御では慣性の問題で応答性が落ちるんじゃないかなと思います。効率はいいですが。

梶田 西脇さんが使われているのは、オーソドックスなサーボモータとハーモニックですけど、実験していて問題に思われることは？

西脇 最近はずっと同じロボット(HRP-2)を使っていて、ある意味では満足ではあるのですが、最近、東大の稲葉先生のところでやっているHRP-3Lを改造した速い脚を見ているとですね、やっぱり速く動けて、大きな加速度もトルクも出せるロボットっていうのは実はとっても重要で、不整地バランス制御を考えても最後には速く動けることはとっても重要だなと思います。人についてゆくとか僕は狙っているわけですけども、やっぱり時速4kmとかは欲しいです。ホンダもトヨタも早い速度を見せていますけども、現状のモータとハーモニックの組み合わせでも、がんばって作りこんでゆけばできるんだというのが隣でやっているのを見ていて思うところですし、それをやってゆくべきなんだと強く感じますね。モータ、減速機は重いですが、オーソドックスな手法のエンジニアリングで、もうちょっと狙えると思います。

梶田 杉原先生はmightyとかの開発を、かなり細かいところまで全部自分でやられていますよね。

杉原 アクチュエータに関しては電磁モータとハーモニックドライブというオーソドックスな構成で、ただサイズが小さいというだけなので、HRPとかと変わらないです。それとは別の個人的な所感なんですけど、学生に人型ロボットの歴史を簡単に教えていますけど、2005年までは日本の独走状態であった、それ以降は、SARCOS、DLRのロボット、最近ではPETMANと凄いのが海外で作られて、もうかなり負けが来てますよ、と言っています。我ながら忸怩たる思いですが...

西脇さんのご感想とは実は逆の意見を持っていて、それまで電磁モータ+ハーモニックドライブという組み合わせですごく苦労してやっていたことを、特に海外のグループにトルク制御であっさりクリアされちゃったという印象です。やっぱり、アクチュエータには高いフィデリティとバックドライバビリティの二つが非常に重要で、逆に言えば、この二つが揃っていたら結構制御がいい加減でもそこそこ安定化できちゃうのかな、と。ただ、トルク制御できる油圧

アクチュエータなどは、大学の実験装置としてはハードルが高いので、トルクセンサを使って、何かフィデリティを高くするような賢いローカルフィードバックを組むやり方がいいのかなと思っています。まあ、僕は機械屋なんで、藤本先生のようにモータを一から作る技術が無いということもありますけど。

梶田 パッシブ・ウォークを作っている方の場合はどうでしょうか？

浅野 僕が作った一番本格的なロボットは、理研のときに指導していた学生と一緒に作ったパラメータ励振原理に基づく歩行ロボットですね。脚質量を上下させるとブランコみたいにエネルギーが増えて歩いていくよっていう歩行ロボットを、学生たちと3年がかりで作りました。確か、学生が2006年にロボット学会で「ロボットの開発」というタイトルで発表したときに、梶田さんに質疑で「その作っているロボット、つまらないね」と言われて学生が絶句してしまって。その時、高西先生が司会してくださってまして。

梶田 そんないじわるな事を言ったかな...

浅野 学生が岡山大学でロボット学会デビューしたときの話です。それで梶田さんから、つまらんよと言われて立ち尽くして、高西先生が「共同研究者の方がいかがですか」と言われて僕が立ち上がって返答したのを覚えています。

で、何でつまらないかと言うと、僕のシミュレーションを忠実に再現しようということで、そのまま伸縮脚で設計したんです。脚が伸び縮みするロボットで、脚を縮めて伸ばすだけでブランコみたいにエネルギーが増えて平地歩行ができるよ、という研究だったんですね。学生は大きさも忠実に再現しようとして、脚の長さが1mの巨大なものを作ったんですね。僕のシミュレーションだと一歩あたり0.8秒くらいでスタスタスタと歩くんだけど、0.8秒だと10cmくらいのストロークを上がって下がってするような速くてパワフルな直動システムってなかなかなくて、いろんなハードウェアの専門家に相談したりして、結局最後はあるメーカーのボールねじを使ったんですけど。それでやっと歩いたと発表すれば、またそこでハードウェアに詳しい人たちから「ボールねじっていうのは凄くエネルギー効率が悪いものだけど、何でわざわざ効率の悪いロボットを作っているんですか」と突っ込まれました。使用した直動システムは有名なメーカーのものですが、スピードやパワーが足りないとか、かなり時間をかけて相談して仕様を決めました。

困ったのは強度の問題で、何回も実験中に壊したんですけど、「ボールねじってのは普通は鉛直方向で使わないんですよ」と言われて、「普通は横に寝かせて使うものだから、縦方向で使ってどのくらいパワーがあるか、強度があるか分からない」と言われた覚えがあるんです。だから速くてパワフル、かつしなやかな直動システムってないかなって随

分学生たちと話した記憶がありますね。結局 Maxon モータを付けて傘歯車の原理で伸縮させるわけだけど、あれで相当なエネルギー損失があるのかな、と。

梶田 ポールねじ自体は、実はそんなにエネルギー効率が悪くはないはずですけどね。

浅野 別の業者さんからも（ポールねじはそれほど非効率ではないと）言われたんだけど、また別の人からは、かなり悪いだろうと指摘されました。

梶田 なんかも、そんなに苦労して作ったものをつまらないって言ってしまって、大変申し訳ありませんでした。

浅野 梶田さんのご意見は、直動じゃそのままだから膝を付けてやったら（脚伸縮ではなく膝の屈曲で励振効果を出しては）どうか、という内容だったと思います。

梶田 ええと…、じゃあ佐野先生は企業[†]と協力して綺麗なパッシブ・ウォークのロボットを作られていますよね。

佐野 高西先生はさきほど、早稲田の内製でという話だったのですが、我々はそのまでのレベルはないですが、プロトタイプ的なところは研究室で作ります。最近では時間との闘いもあるので、耐久性や精度の問題はありますが、ラピッドプロトで部品を作って組み込み、すぐに実験して良し悪しを判断します。うまく行きそうだなということになれば、基本デザインはできているので、少しお金をかけて外注で加工精度や意匠性を考慮してきちっと作り込むことをしています。これが全部内製でできるとまたいいと思うんですけどね。

我々は受動歩行なのでアクチュエータ云々というよりは、シンプルな工夫を心がけています。膝関節はある程度人間と同じように受動抵抗があったほうがいいということで、ある人に聞いて釣りのリールの部品（ドラグ）に注目しました。どういふものかと言うと、抵抗が小さすぎるとパーツと糸が出てしまうので、非常に糸がからまりやすいんですね。で、抵抗が大きいと糸がすぐ切れてしまうということで、抵抗が調節できる結構絶妙な仕組みになっているらしいんですね。さっそくりールを買って見栄えどうこう関係なくそれを関節に無理やりつけて可能性を見たりしています。

高西 そういう意味ではさっきの玄さんの油圧で、僕も昔修士論文でやったのは、油圧でもともと位置制御向けに作られているから、わざとプレッシャーとリターンとの間に「スピコン」っていった粘性要素になるバルブを入れるんですよ。そうすると、そこへ並列にアクチュエータを付けておけば、見かけ上はダンパーになる。で、それが可変にできて、それが着地の時のインパクトをどれだけ下げられるかとか、そういう意味で油圧は比較的システムティックに構成しやすいかも知れないですね。ただ油漏れとかね、まあ、いろいろ…。

[†]株式会社 今仙技術研究所

佐野 受動歩行機は全体的にシンプルなので、やはりコンパクトに組み込みたいというのがあってですね。軽量とか。そんな中でリールがわりとピッタリだったんですね。常に何か役立ちそうなものをウォッチしています。

玄 ER アクチュエータとかありませんでしたっけ？

佐野 私も、もともと電気粘性流体（ER 流体）をやっていたので、ちょっとそれも頭をよぎったんですけど…。

高西 あと、高電圧が必要ですよな。

佐野 そうですね、電流は大したことないんですが。ただ、やはり電極間のギャップやそれこそ流体の漏れをコントロールしたり、高電圧電源を乗せるとかなるので、広く使われているドラグのような機構に期待を寄せました。

6. 歩行の衝撃吸収

佐野 それからあと、さきほど弾性要素って話があったんですけど、我々は今2足走行ロボットもやっているんですけど、基本的にばね要素ってのはあまりなくて、いわゆる固いロッドがバウンスするっていうので走行ロボットを開発しています。それで、必ずしも「生体のような柔らかさ」で柔らかい動きを出すっていうよりも、固いものでも色んな意味で柔らかい動きってのが生成できるんじゃないかなと思っています。ちょっと視点が違うかもしれませんが、自転車には柔らかいタイヤが付いているんですけど、フレームによっても乗り心地がずいぶん違うらしいんですね。だから、着地時の衝突一つとってみても、柔らかいものを挿むという考え方だけでなく、金属フレームなんだけど衝撃が緩和されたら面白いなと。

高西 自転車でフレームにばねダンパがついてて（梶田：マウンテン・バイクみたいな）、そういう意味じゃなくて。

佐野 そう言う意味じゃなくて、金属の材料特性でもずいぶん違うと聞いたことがあります。やはり、受動歩行するのは衝突というのが重要なファクタになっているんですけども、やっぱりコツン、コツンって（机を叩きつつ）独特な音で歩きますね。人間は静かにしなやかに歩ける。単に足裏が柔らかいだけではないのでは、自分の中ではちょっと違うやり方がないのかなって思っています。

梶田 浅野先生のところの受動歩行の装置は何か衝撃吸収的なものは入っていないんですか？

浅野 最近の（自分で開発している）歩行器は、佐野先生が作られているのと同じ、ロッドの先にゴムキャップが付いてあるとか、その程度ですね。あとトレッドミルの表面が柔らかいんで、それでまあいいかなって感じで。でもやっぱり、自分を守るという意味で自分の脚先が柔らかいことも大事だけど、相手が柔らかい場合が問題ですね。受動歩行器の一つの大きな弱点は、砂場が歩けないことですね。一歩足を踏み入れたら、グッと止まるわけですよ。

梶田 それはどのロボットも同じですよ（一同笑）。

浅野 風を切ってスタスタ歩いてきたやつが、砂場に一步踏み込んだら、いきなりグンッと止まってしまうね。脚先にコンプライアンスがあると、歩容を大きく変化させたり減速したりせずに歩き続けるってことが最近少しずつ分かってきているので、やっぱり柔らかさは凄く大事だと思います。

梶田 砂場に踏み込んだ場合でも、コンプライアンスを入れてると、ちゃんと歩き続けるんですか？それは面白いですね。

浅野 はい、ピアノの鍵盤の上を歩かせるようなシミュレーションをやってみました。水平方向には滑らないんだけど、鉛直方向には踏み込んだら沈むという条件で。剛体の脚だと2,3歩踏み込んだら急に失速して止まったりするんですけど、柔らかい脚だと（基本的に歩行は低速ですが）踏み込んだ後もあまり失速せずに歩き続けたりするんです。それを数式でスパッと説明しろって言われたら困るんだけど、ただ、経験的には脚（足）の柔らかさっていうのは自分を守るっていう意味と環境に適応するっていう意味で両方メリットがあると感じています。

7. 不整地歩行制御

梶田 なるほど、佐野先生が指摘されたのとは、また異なる別のポイントですね。それで今の話の流れで、不整地をいかにして乗り越えるかっていうのは2足屋さんにとっては大きな課題だと思います。とりあえず、僕が一番身近なところで西脇さんがいるんな不整地を歩かせる実験をやっているんですけど、どうですか？今の課題とか。

西脇 そうですね。結局ロボットのモデルが正確に分かっていて、いかに正確に床反力が制御できるか、応答性良く制御できるかが重要だと思うんですね、モデルベースで考えてゆくと。そうした時に、やわらかさがあると床面の固さによらず、その接触状態を保ちながら、自分の知っている「やわらかさモデル」のもとで床反力制御ができるという利点は非常にあると思うんですね。床側の固さの差異の影響が大きく出てこない。そういう意味では足は柔らかいほうが、衝突問題もありますし、この先もいい点がきつとあるなあと思っています。

それで、不整地は大分見えてきているようで、苦しんでいるような気もするんですけど、最後の最後にはとっさに足が踏み出せるような速さというのが重要だと思ってます。で、本当に足の裏の床反力だけ制御できていればいのであれば、先ほど杉原君に指摘されましたけど、まだ固いモータ+床反力センサ+それなりの柔らかさでも実現できる気がします。一方で、足以外のところで衝突するような事を考え始めたら、やっぱり、モータ自身がそれなりにバックドライバブルであるとか、トルクが制御できているとかの要素が必要になってくるのかなって考えています。

もう一つは、やっぱりセンシング。遠くから見たセンシングと計画との組み合わせってのは絶対必要だと僕は思っていて、目でみて「ここは砂場だ」、「ここ氷の路面だ」という認識ができるからこそ、そういうところは慎重に歩くでしょうし、そうじゃなくて平地だと思っているところはスタスタといいエネルギー効率で歩くでしょうから、そういう意味でのセンシングも必要でしょう。あと階段、数cm以上の遊脚で前にあたるような段差ですとか、そんな事も考えると目で見て、どこを踏むかという計画ができて、ここで転びそうになったらどっちに足をおいても踏める場所がありそうなのかって事を知っているような認識・計画とのうまい組み合わせをやってゆくと、エネルギー効率とかはまず置いといて転ばないという道筋はその先には見えてくるんじゃないかなと僕は信じています。

梶田 高西先生のところでは結構学生さんがいろいろやられていますけど、どうですか？

高西 いくつかの視点でやっているんですけど、一つはね、不整地のモデリングってあんまりこれまでやられてなかったと思うんですよ。何となく凸凹とかすべりとか。その辺はもう一寸ちゃんとやったほうがいいんじゃないかなと。それができるようになれば、今はシミュレーション技術がどんどん発達してるから、そこの関係で色々さぐることが出来る可能性もあります。現実問題として、砂場とかいろいろなところがあるので、それをモデル化するとパラメータがどのような環境なんだとか、関係がつけられる。と、いうことで、パラメータを作るための専用の実験装置を作ったりとか、そういうのはやってはいますけどね。

それと同時に、最初のほうでちょっと言いましたが、人の歩行がどうなっているんだっていうのが、やっぱりヒューマノイドをやっているのでもいつも気になっています。最近、東京女子医大との共同研究ということでいくつかの科の先生とやっているんですけど、リハビリ科の先生といろいろ話を進めているんですけど、そういう人たちって結構ね外乱とか不整地を、特に高齢者とかかわりていっぱい実験しているんですね。例えば、さっき西脇さんがおっしゃったような、事前にいろいろ情報がわかっているのと、わかっていないのとでは全然挙動が違うという研究論文をたくさん書かれてたりとかね。で、高齢者になるとどうしても転倒が怖いので、歩幅が短くなったり、歩行周期もすごい短いですよ。それは、何かでエラーしたときに転倒しないとか、フェイルの側に入らないようにするための経験と言いか、もう反射的に持っているもんだと思いますけど、そういうものがどうなかって事と。あとね、加齢してくるとね、僕なんかもそうなんですけど、筋力がだんだん出なくなるわけです。そうするとむしろ、さっきのパッシブ・ウォーキングではないけれど、むしろそっちの側をうまく利用して高齢者っていうのは歩いているんじゃないかと

かね、最近ちょっと思うようになってきました。人間の側のエキスパートの人たちと色々コラボレーションすると、彼らなりに長い経験と感覚を持っていて、2足ロボットの歩行を見せると、結構色んなアドバイスとかしてくれるんです。だから、これは本当にありがたいなと思っていて、そういう方向とのタイアップがすごく重要な気がします。

梶田 なるほど！お医者さんに診てもらおうとロボットの歩きが良くなるんですね！

高西 いや、あのね、やっぱり昔の2足に比べたらうちの場合、たまたま骨盤を持って、膝を伸ばしたりとかできるんで、そういう意味ではお医者さんなりに、自分たちの研究がこういうところうまくタイアップすれば、リハビリをもっとどうやったらうまくできるかとか。あるいは、さっきの話で人をなかなか実験に使えなくなってるじゃないですか。だから、人の代わりにね。ロボットだったら転倒してもお金だけで賄えるとか。そういうふうな事もあって興味をもらえるようになりつつあります。

梶田 はい。そっちに行くと、より環境を精密に認識するようにして、より巧みに情報を使って予測してみたいな話……じゃあないところで、不整地対応があり得るって言いたいんじゃないかなって思うんですけど、杉原さん？

杉原 それで、僕にアイコンタクトを送ってらしたんですか（一同笑）まさに梶田さんの読みの通りで、事前に路面の情報を知って歩きの戦略を変えることの重要性は重々理解した上で、それでも我々は目をつぶってても歩けちゃう、っていうのが本当にずっと不思議です。お猿さんを訓練したらスタスタうまく歩けるようになるとか、足の不自由な方がリハビリして歩行がどんどん美しくなったとかいうお話をいろんな方から聴いたりして、なるほど面白いと思う一方で、足が不自由な状態でもとりあえずは歩けた、と言うのがすごく不思議。お猿さんにしてもまず歩けないと訓練すらできない。犬でさえ2足歩行できるわけだね。だからその辺、つまり「2足歩行の必要条件」を説明することが、多分ロボット屋さんの僕が勝手に思ってるんですけど、まずやることで、それありきでさらに路面に合わせた制御戦略なんて話につながるんじゃないかな、とずっと思っているんですけど。

西脇 うん、なんか、言われたから返すわけじゃないんですけど…（笑）、いや、いいなって思っているのは、歩行を観測している人たちと話すとき「こういうフェーズがあります」「こういうフェーズにはこんな事をしています」とかいう説明をよくしてくれるんですね。一方で「こんな反射があります」って話もしてくれるんですけど、何で転ばない？って話はできないんですね。何ていうかな、力学的にこうだから転ばないんだよって話はできなくて、すごい定性的な反射の組み合わせの話までで止まってしまうんですね。だから、杉原君が言っているようなその、「何でこん

なに不自由そうでも転ばない」っていうその根源的なところってのをロボットで説明できると、実はそこは人間の歩行を見てる人にも分かってなかったところで、いい話じゃないのかな？と僕は今聞いていて思いました。

杉原 先ほど高西先生がおっしゃったアラン・ベルトース先生の話ですけど、あれを聞いたときも、「でも目つぶって歩けるよね」とか「酔っ払っても歩けるよね」とか、いろんなことを思ったんですね（一同笑）。だとすると、視線安定化というのはもちろん重要なファクターではあるんだけど、必要条件ではない。

高西 研究するのは、いろんな方向性があっていいと思うんですよ。その一つとしてウチだとこの環境があるので、本当に毎週その先生（医師）が研究スタッフのところに来て色んなディスカッションをしているんです（杉原「その研究が非常に意義のあるものだ」という点に、異論はないです」）

さっきの例えば、目をつぶってても歩けるって言った時に「ずっと平坦な道だぞ」って言うておいて、突然1cmでも段差があると転倒するらしいんですよ、その先生に言わせるとね。そういう実験を昔やったらいいです。それから、いろんなリハビリの先生っていうのは事故にあった人の治療を大量にやっていて、事前の情報が目で見えるってことが重要だって言うんですよ。何となく知能とかもっと上位のことを考えてくると、そっちのほうもすごく重要じゃないかなと思います。

佐野 いわゆる壊れたエスカレータ問題ってご存知ですか（高西「NTTの五味さんが論文[†]を出されていますね」）。止まっているエスカレータに乗ろうとすると足がもつれる話です。歩行がらみで人間のそういう特異的な挙動にも注目しています。

杉原 そのエスカレータの話ですが、僕はそういうことになったことないですよ（一同笑）。エスカレータの入り口って傾いていますよね。それが余計に加速してくれるお蔭で、動いているエスカレータにスムーズに乗っていける、というふうに考えているんですよ。だから、止まっているエスカレータで「おっと」って最初なのは、多分あの傾きが原因で、あれが平らだったら普通に昇れるんじゃないかと思います（佐野：どこの傾きですか？）エスカレータに乗るすぐ手前に傾きがありますよ（高西：降りるほうはないんですか？）降りるほうは逆に上がる傾きになりますね。で、今度は勝手に減速されて止まっている床に適應できると、別に特許をみたわけじゃないんですけど、多分、エスカレータ屋さんのノウハウがそこにあるんじゃないか

[†]T. Fukui, T. Kimura, K. Kadota, S. Shimojo, and H. Gomi: "Odd Sensation Induced by Moving-Phantom which Triggers Subconscious Motor Program," PLoS ONE, Vol. 4, No. 6, e5782, 2009.

なと勝手に思っています。

視覚が必要条件でないとやっているのは、僕は自分自身でそれをよく実感するからです。目をつぶったまま階段を上るってことをよくやるんですよ。滅多に転ばないですね。転びそうにはなるけど、転ばない。

高西 でもそれは、頭の中にすでに想定してるでしょ？ 現実にはありえないけど、突然階段が現れたらどうするんです？

杉原 さすがにそういう状況では無理と思いますけど、ええとですね、大学時代、上野駅から東大まで上野公園の中を歩いてたんですが、結構長い距離を目をつぶって歩いたりしてました（高西「でも、すでに目を開いて歩いてた道ではあるんでしょ？」）いやあ、どこに段差があって、傾きや石畳があってなんてのは、とても憶え切れないです（一同笑）

佐野 それで歩けるとなると、まさに受動歩行的に環境とのインタラクションで足が出て、っていうそっちにはあまり行かないんですか？

杉原 僕はそれは、いちばん低レベルにあるフィードバック制御のなせる業で、受動歩行では説明できないと思っています。

浅野 全員経験があるだろうと思うのは、階段を下りていて（実際には階段が終わっているのに）もう一段あるだろうと思って何となく足を出した時に、ズバーンってヒットして凄く驚くし、かなり衝撃を感じますよね。それやるたびに、予め知ってるか否かっていうのは、本当に大きいんだなってことを実感します。だから、受動歩行がやっているのは、ズバーンってヒットして驚いても、それでも歩き続けるっていう研究ですよ（笑）。受動歩行がある意味乱暴だなと感じるのは、ビジュアルフィードバックも計画を立てる脳味噌も無いんだけど、体だけぶつけていって、それでも歩き続けるっていう研究をやっているからですよ。だから、そこで見えてくるものを基礎にして、軌道計画や知的な制御が加われば、本当に素晴らしいものが出来るんじゃないかなって思ってます。

8. 海外の2足歩行ロボット

梶田 いい感じにまとまりつつありますね！ そろそろ時間がなくて、えっとですね、さっき杉原さんが指摘した聞き捨てならない問題として、そろそろ日本国外での2足歩行研究が、かなり勢いを増しつつあるという状況に対して、我々はどうしなきゃいけないか、どなたかご意見をいただきたいんですけど。そうですね、玄さんなんかは中立的な立場としてどう思われますか？ 別に2足歩行するのは日本人だけじゃないし、日本人だけが2足歩行ロボットをやってきたわけでもないわけですが、そもそも SARCOS のロボットはアメリカ製ですよ。

玄 だいぶ盛り上がってきてますよね、欧米とかものすごい勢いで若い人がかなり参入して、何故かと言うことを考えるとやっぱり勝てるからという事でしょうね。絶対勝てるぞ、という信念があると（梶田：日本の研究に勝てる？）そう、こうすれば勝てるとうビジョンがあると思うんです。確かに、最近の ASIMO のパフォーマンスはすばらしく、目を見張るものがあったと思うんですね、じゃその次にどういった新しい技術が出るか。これは難しい問題だと思います。

梶田 実は、新型 ASIMO が発表される直前まで、PET-MAN の動画が丁度公開されたばかりで、もうホンダの時代じゃないんだってというような論調さえネット上では見られた気がしますね。

玄 盛り上がってる理由の一つ、脳科学の研究者がだいぶ参入してきているということがあると思います。

梶田 そんなに脳科学の人がタッチしてきてますかね？ CMU あたり？

玄 ATR と関連深い CMU や USC の他にも、さっきの高西先生の話にあったベルトース先生、とかイタリアの IIT のグループとかですね。

高西 昔からやりたいと思っている若い人はいっぱいいて、たぶん欧米だとお金が出なかったのが大きいと思うんですよ。実は去年の年末にオランダのデルフト工科大で講演を頼まれて行ったんだけど「ぜひ2足ロボットやりたい」って若い子がいっぱいいるんですよ。目を輝かせてね。で、いろんな質問もしてくるし。そういう意味では日本の若い人と変わらないなという。昔だったら、なかなかそこに意義が見いだせない、プロポーザル書いたってお金が出なかったのが、ホンダとか大きなメーカーとかが開発してみんなの目に触れるようになって、で、調べようと思ったら、日本で何十年も前から2足歩行の論文を書いていますよね。それを好きだけ読めるわけだし、その先にまた何かがないかって彼らが思うのは自然かなって、つくづくオランダに行って思いましたけど。若い先生なんか「次、どうやったらいいと思うか」って事を平気で聞いてくるし、研究体制みたいなのを日本にすごく興味があって、例えば、早稲田は比較的ロボット関係の人がうまくオーガナイズされてると思うけど、彼らはみんなバラバラにロボット研究をやっているの、そのリオーガナイズみたいな事をどうやって進めるといいの、とかね。

結構、日本に学んでいるいろんなことをやるうっていうのも、ま、いろんな日本の文化、寿司とか漫画とかアニメとか外に広がりつつありますからね。びっくりしたのがですね、講演の最初に早稲田の説明をすると大隈重信を出しても知らないけど、「ノルウェーの森」の村上春樹（早稲田大学文学部卒）の名前を出すと結構わかる若い人たちが多んですよ。だから、ジェネレーションがどんどん変わってきて、人型ロボットの研究をやるのに抵抗感がないという、自然

にその先の延長上にオリジナルなものは何かというのを見据えているような若い人が多いのではないかと思いました。

佐野 日本がある程度この分野で活躍してきたので、次やるほうとしては、その先を行かないといけないので、相当分析しますよね。論文も読んでその先に何があるか見ている。今欧米のほうがちょっと勢いがあるってことになれば、また今度は日本もその先どこへターゲットをもっていくか、PETMANの次は何か、今丁度考えるいい時期じゃないかって気がします。

あと、レイバートがどのくらい自身の考えを下まで浸透させているかっていうのが興味がありますね。例えばアップルのジョブスのように相当細部まで指揮しているのか、キーパーソンが3人くらいいて回しているのか、その辺の体制ですね。研究体制が変わるとすごいロボットが次に日本でも登場してくるのか、興味があります。

高西 レイバートがMITをやめて作った会社、Boston Dynamicsを以前見学させてもらったのですが、開発ってというか、実験のオートメーション、というか、そこにかかわった人間がいかにか自分のセンスを生かせるか、っていうための周辺の環境を整えるということ、凄くよく考えているなと思いましたね。

梶田 若手の立場から、今の状況に対するコメントが欲しいんですけど。

西脇 若手が、僕らが若手のままなんですよ(笑)。さきほど小さい受動歩行コミュニティというコメントがありましたけど、ZMPコミュニティはもっと小っちゃいじゃないかと思うくらいに日本で。なかなか、卒業して研究者に残る人もそんなに増えてかないんじゃないかと思えます。もちろん、ホンダやトヨタに入っちゃうってのはいいかもしれませんが、佐野先生は、もう一回再設定したら膨れるよとおっしゃって、それだといいなと思う半分、なんかロボットやってる人達がもう2足歩行ロボットに飽きてっていうか、息切れしてっていうか。

2つあると思うんですよ。一つは「歩いちゃったじゃん」さきほど高西先生がおっしゃったように基本のセオリーはわかっている、走っちゃったじゃん、面白くない。もう一つはこの先は大変すぎて使い物になるまで遠いという見極めのもとに「2足じゃない形態のほうがいいんじゃないの」って、一般の人よりもロボット研究者のほうが余計そう言うような気がするんですよ。僕は後者のほうが何となく悔しいなと思えます。もっと「着実に進歩してるんだよ、魅力的な研究フィールドなんだよ」というのを見せていけないと、なかなか参入してもらえないですね。それがたぶん、言い方悪いですけど、海外の人は疲れてなくて、何か楽しそうに見えているんで、やってる事も凄いなって思うのもありますけど、「なあんだ…でも楽しそうだな」って思うことも沢山あると思いますよね(笑)。そういう意味で

今ちょっと2足、日本でやってると寂しいなと思うことがあります。

杉原 まず大学人から見た現状として、海外と言っても目立っているのは数グループと言って良いと思いますが、ハードウェア的なビハインドが大きいですね。DLRのロボットにしるPETMANにしる、ハードウェアが非常に素晴らしくて、あれほどのものを大学レベルで作るところにまず大きなハードルがあるかと思えます。日本にしてもP2は企業から出たものですし、それを高西先生のところが大学でやっちゃったというのは、そう考えると凄いことなんですが...

もう一つ、これは誤解があったら高西先生にぜひ正して頂きたいのですが、日本の2足歩行ブームが筑波万博(1985年)の後に去りましたよね。その直後ぐらいにレイバートがホッピングロボットを出してきたんじゃないかと。(佐野:80年後半ね)。そう。それと良く似た状況に今なっているのかな、と思うんです。共通点を分析するのは難しいですが、直感的には今の日本と80年代前半の日本は「スタンダード」が揃い過ぎたのではないかと。ちょっとご本人を前にして言い辛いんですけど、人型に限って言えば、今、梶田さんの制御の設計セオリーに乗っかっている人が多過ぎる感じがします。で、多分海外の人はそういう縛りがなくて、色んな発想でもって制御器を作っている。ダイバージェンスがありますよね。そこも違うかなという気がします。

梶田 年寄りももう少し静かにしてるということ?(杉原「そういう意味では全然ないです」)(笑)。杉原先生の問題提起は、現在の日本の2足歩行研究が均一化しすぎてきらいがあって、ぶっとんだ新しい発想を出にくくなっているんじゃないか事だと思います。そこは学会での雰囲気づくりを含めて我々は注意しなきゃいけないかもしれないですね。浅野先生からは何かありますか?

浅野 昨日の受動歩行の会議では、日本人はちょっとアピールが下手というか宣伝があまり上手ではないところがあるねって話が出ました。受動歩行の論文もScienceに出たりしましたが、ああいうのを見るとやっぱり論文の書き方がすごく上手で魅力的なペーパーに仕上がっていると感じます。

梶田 彼らも、論文がScienceにアクセプトされるまでに結構苦労したらしいですよ。

浅野 アメリカの研究所だと研究員は研究に没頭して、いざ論文を書くとなったらグラフィックデザイナーが図を作ってくれたりして、かなり分業できているってこの前テレビで観たんだけど、日本では研究は頑張るけど絵が下手で損をしたり、表に出すのがちょっと下手なのかなと感じます。あと、最近の中高生と話をすると、彼らの目が肥えているというか、ホンダのヒューマノイドも子供のころから知っているし、「あれ以上、何するんですか?」という質

問をされたことがあるんだけど、若い人たちの要求水準が高くなり過ぎているのかなと感じます。あと、博士に比べて2足歩行ロボットの研究をしてハッピーになれるよって、自信を持って言えないというか、僕はこの仕事に就いて良かったと思うんだけど、今「博士行きなよ」って若い人に言い辛いなっていう気持ちが正直ありますね。そこいくと欧米はちょっと違うのかなと。もうちょっと中高、あと大学生もそうだけど、「こんなに夢があるんだよ」というところをもっと見せないよ。

佐野 次に何があるかってのは、少なくとも我々のあたりで絵が描けられないと、若い人がそれをやりたいなって思わないですよ。梶田さんと杉原先生連名で解説が書かれて、僕も部屋に貼ってあるんですけど、何年後にどれくらいのスピードで何ができるとか。ある程度PETMANできている部分もあるんだけど、その次に何が…。一つは単に運動性能だけじゃなくて、高西先生がやられているように、いかに社会的に2足歩行ロボットの技術が生かせるかってのもあっていいと思うんですよ。特に最近の若い学生は福祉とか医療とか、そういう社会的なところに結構興味があって、ロボットの技術がリハビリに使えるとか、そういうのがあると「やってみたい」という人が増えてくるかもしれない。我々も受動歩行の技術を歩行支援に使うとか、最近は社会問題を考慮してテーマ設定することが多くなっています。研究を継続的にやっていくには、ある程度の柔軟性も必要ですね。高西先生のように建物が建って人が来るようになっていけば出会いがあって、そこで研究が広がったりすると思います。やはり、そういうところから絵が描けるのではないのでしょうか。

9. 東日本大震災と原発事故をうけて…

梶田 社会とのつながりという件で僕が一つ是非伺いたかったことがあります。去年(2011年)の東日本大震災の後、特に原発の事故の後で当初日本製のロボットが活躍できなかったということをニュースで見ている、研究者として非常に忸怩たる思いがありました。これに対して何かコメントをいただきたいんですけど、どうですかね？難しいところでいきなり藤本先生に。

藤本 難しいですね。たぶん、一般の人は、ああいう状況になってアシモみたいなもの行って何か作業してくるというのを普通にイメージすると思いますね。社会一般で考えるロボット技術と現状のロボット技術にかなりギャップがあるってのを、一般の人は知らないわけです。一方で、我々もロボットが途中転んだら、またそれを助けにロボットを送らなきゃいけない状況になっちゃうんで、2足でつてことになるとなかなかまずは難しいのが現状ですよ。ただ、逆に言うとなかなか本当使える2足技術があったとすれば、本当に状況は違ってきたらうなって今

になって思えばありますね。もし次に何かそういうことがあったときに、2足歩行ロボットの技術がそういう場面でも適用できるようにってというのは一つのテーマとして考えていいんじゃないかと思えますね。

浅野 2足ロボットやヒューマノイドに限らない話になりますが、現在のロボット技術が役に立ってる場面は大震災の時もあったような気がするんですね[†]。日本の強みであるヒューマノイド技術を実際に役立たせようってというのが産総研ヒューマノイドグループの目標でもあったわけですよ。それすごくまっとうな方向だし、そうあるべきだと自分も思います。原子炉施設内などはまさにロボットたちが活躍すべき場だと思うんですが、でも震災だ、非常時だ、出動だとなったときに、何処から出動するの誰が操縦するのとか、作業中に事故があったときに誰が責任を負うのかとか、(素人の見解ですが)そのあたりの法律的な準備が殆どできていないように思います。本当にロボット技術を災害救助に役立てるなら、普段から救急車や消防車に並んでロボットたちも待機してなきゃいけないわけですよ。技術ばかり進歩してもと思いますが、日本は安全基準が凄く厳しいから、なかなかそこに行けないのかなって気がします。

高西 レスキューだとリスクはコミで考えられるでしょ。生活支援てのは知らない人が使うことが前提なのでPL法から含めてすごい厳しい法律が出来上がってるんですね。医療もそうなんだけど。レスキューとなると場合によたら失敗というか、がれきの下にいて、それを上げようと思ったらクレーンのところが崩れて残念ながら何人が亡くなったと言ってもそれを責められないですね。あと、完全な自律はすぐには不可能なので、遠隔操縦にならざるを得ず、責任の所在をオペレータにもってゆけるんですよ。

梶田 レスキュー用のヒューマノイドであれば、当面は遠隔操縦ですよ。

高西 梶田さんはご存じだと思いますけど、極限作業ロボットのプロジェクトってね、たぶん、日本で史上最大のお金がつぎ込まれましたけど(梶田:200億円です)、あの時に実はそういうのがプロジェクトの計画段階ではあったんですよ。原発とあと石油化学プラント。ですから技術の問題じゃなくて、むしろ政治というか要するに当時の通産省が管轄するところで、石油化学プラントの火事とか、原発事故なんかあり得ないということで、つぶされちゃったんですよ。その後、東海村のJCOの臨界事故でちょっとそういう声が上がってやったけど、そのうちまたつぶされて…。だから、あれはね、完全に技術論じゃなくて政治的意味合いがすごい強いと。

梶田 うーん、僕はもちろん政治的な問題もあるんだけど

[†]2011年7月以降、千葉工業大学のQuinceが福島第一原発建屋内に投入され線量率の測定や写真撮影などに活用されている。ただし、人間型ロボットが事故現場に投入された例はない。

ど、でもやっぱり技術としてホイット、うちの研究室のロボットを消防隊や自衛隊に渡せば原発の中に入れていけるよ、っていうレベルにはまだちょっと達してない気がしてます。特に2足歩行のヒューマノイドではまだ。

高西 だからそういう研究をやらしてくれなかったんですよ。お金を付けないんだもの。おっしゃるとおりなんですけど、その理由がね。

梶田 確かにそうですね。それでも僕は逆に、今回の事故によって今度こそ、2足歩行のヒューマノイドが必要だということ誰の目にもハッキリしたと思っているんですよ。結局、未来に何が起きるかは誰にも予測できないので、その時にどんな状況でも使えるロボットとして、ヒューマノイド形態というのは究極の選択としてあると。それは国家として持ってなきゃいけない技術だと思っんです。

高西 そりゃあれですかね。日本だけが占有すべき問題かな。日本の場合、もう外圧使わないと何かできないかな、って気持ちがあるんです。本当にこの先またロボットを本格的に使ったレスキュー関係の研究とかが進むのか怪しいなっていう懸念を持っています。

ところが海外へ行くたびに、何で日本がそういうプロジェクトが立ち上がってないのかって聞かれるんですよ。ある先生なんかはダボス会議に出るんだけど、もし日本がそういうのをやるんだしたら、自分が一発ぶってもいいとか言ってくれたりとかね。それから、中国はすごいですよ。そういうのを買おうとして、日本に結構派遣してきていますからね。日本から買えるならすぐ買いたいという相談にきたりとか。だから、もう少し国際的な視点で、こういうのってやったらいい気がするんです[†]。

梶田 確かに必ずしも日本だけでやる必要はないですよ。

佐野 使えるものにしようとする、相当な資金とマンパワーがいりますよね。一方でヒューマノイドで生活支援とか、産総研でやられているアミューズメントとか、あまり幅を広げすぎるとなかなか難しいのでは。生活支援をやりながら技術を上げて行くと、いざといった時に原発みたいなところでも使えるのか、やっぱりどういう環境で使うのか目標をはっきりしないと使えるものが出来ないのか、どうなんですかねその辺りは。

梶田 僕自身は、エンターテインメントでジェネラルに技術を磨いておいて、いざと言うときレスキューにも使えるヒューマノイドというのは十分あり得ると思っています。実験室の外へロボットを持ち出し、ステージの上で確実に動かさなければ大変な事になるという意味で、エンターテ

インメント応用というのも結構過酷で、レスキューロボットに通じるものがあると感じています。

杉原 ちょっといいですか。先ほど梶田さんのおっしゃった、震災を受けてますます2足歩行や人型ロボットの有用性が示されたというのは、全く同感なんですけど、ただ、それを言うには今の我々の技術は余りにも低い。そして我々は、それを正直に言うべきだと思います。それはもちろん世間に対しても言うんだけど、自分自身に対しても言って、制御を考えるときの仮定をもっと荒くすべきでしょう。それが研究レベルでの課題。

それから、さっき何で今日本は元気ないのかってこと理由として、ハードウェアの問題と、ダイバージェンスがなくなっているという話をしましたけども、それ以上に言いたいたのは、それでも80年代前半で2足歩行の研究が潰えなかったのは、その後頑張られた、例えば高西先生や梶田さんや佐野先生のお力があると思っているんですよ。つまり、不遇の時代にそれでも情熱を以て研究をやった方がいらしたからで、そのお蔭で僕は、有難いことに後発として参加させて頂けると。今が同じ状況だとしたら、我々もその不遇の状況を耐え忍んで乗り越えないといけな。資金的な問題もあり、色んな社会的問題もありけども、それを言い訳にせずにカツカツながら続ける情熱が必要なのかなと思います。

玄 その関連で言うと、僕も同じ意見ですけど。実用、使えるから必要だ、やらないといけな、そういうものよりは先生方はやっぱり面白いからやってる、ぶっちゃけそういう事だと思うんですが(一同笑)。今、急にこう何かの役に立つからとか、そりゃもちろん議論は必要、お金は必要なんですけど、根底として正直に若い人にちゃんと夢を、やりたいからやるんだと、面白いからやる、誰でも参入できる、誰にでもチャンスはある、そういう数少ない分野の一つだと思うんですよ。歩行ロボットは、色々なことを学べるし、その魅力をまずちゃんと、教育的な意義を説いた上で、さらに将来的にはこういう実用の方向もあるよってことを一緒に言ったほうがいい気がします。

梶田 (感動して沈黙)うれしい言葉ですね。わりに最近の学生さんの意見を聞くと、やっぱりロボットは実用的で人の役にたたないといけな、とか、そんな遊びみたいな研究やってる場合じゃないだろというふうに、レポートに書かれたこともありまして、へえっ、みんな真面目なんだなと思ったこともありますけど、我々の楽しさの伝え方がまだ足りないのかも知れなそうです。

佐野 僕がMITのレイバートの研究室へ行ったときなんか、色んなロボットが飾ってあって、なんかこう、おもちゃ箱みたいな感じですよ。レイバートの部屋なんかアクリルエータが柵に飾ってあったりして、ボストンダイナミクスも結構そういう雰囲気はまだ保ってい

[†]本座談会の後、米国防高等研究計画局は事故により破損した建造物内での危険かつ複雑な作業を行うためのロボット技術開発コンペティション DARPA Robotics Challenge を発表した(2012年4月10日)。ここではロボット形状の有力な候補としてヒューマノイドを示しており、海外からの参加も呼び掛けている。

るんじゃないかと思うんですけどね。高西先生のところもたぶん同じような感じですよ。

高西 僕も MIT に 1990 年から一年間行ってたときに、彼の研究室で Lab meeting って言って月に 1, 2 回研究会みたいなのを開いているんですよ。やっぱりね、そういう楽しむ時間を実にうまく作ってるなあと。ピザをとって冷蔵庫の中はね、コカコーラとか色んな飲み物があって、お酒はだめなんですけど、それでみんなこう寄ってね、それぞれ担当の曜日を決めて、もう誰でも来ていいみたいところでやってた。その雰囲気ってのは本当に忘れられないですね。

当時伸縮脚の 2 足があったかな、レシプロエンジンを改造して、それで Leg の上下運動と点火のタイミングをとるメカニカルなリンクがあって、結構面白いことをやりました。DARPA の研究だとかで、すぐに発表できないとか言ってたけど。そういう楽しみながら研究するって、だんだん出来ずらくなってるんじゃないですかね。

佐野 もともと僕も加藤先生の遊び心みたいところからスタートして。だから、ずっと楽しみながら、いろいろ外向きの話はするんですけど、最後はそこかなっていう。それでしぶとく生きながらえるという。まあ、ライバルが出ると、半分こう悔しい思いで、それを超えてやろうみたいな、そういう思いってのはありますね。

高西 だから、少々辛くてもやれたし。

10. 今後の抱負

梶田 それじゃ最後に、これからの抱負を。今度は若者から行きましょうか。これから何をねらってゆくか、ってところを杉原先生。

杉原 さっきも言いましたが、歩行できる機械は有用、というのは僕の信念としてあるわけです。もちろん、動機がそもそも趣味的なことで、その楽しさを享受しつつも、やっぱりどこかで役に立つものを作りたかって気持ちがあって、歩行機械は絶対役に立つ、と。で、2足歩行は全ての歩行機械の基本だと考えているんですね。逆にそう言えるような制御理論と機械の作り方、動かし方を、これからも研究し続けていきたいです。

梶田 いいですね！じゃあ浅野先生。

浅野 そうですね。子供のころ、10 歳くらいのときに、大人になったらロボットの研究がしたいって思ったんだけど、アニメーションの影響を凄く受けて。ただ実際に研究者になってみると、ロボットって一生懸命頑張って作ってもアニメのようにカッコ良くは動いてくれない、そういう現実を思い知って。やっぱりロボットの研究者って、言い方が悪いけど、ガッカリした人（一同笑）、現実は思い描いていたアニメのロボットとは違うんだってことで、ガッカリした経験を持つ人も少なくないと思うんですね。だけ

ど、それでも夢を持って研究を続けていくと、何故歩けるのか、歩いてどうということか、そういうことが分かってくる。人間の精神活動の中で一番根源的な喜びっていうのは「知る喜び」だと思うんです。歩行って運動は深いし、みんな何気なく歩いているんだけど、何故歩けるかってことをちゃんと説明できる人はいないわけです。だから、アニメーションを見て、ああロボットってカッコ良いなっていうのも喜びだけど、それとは違う学問としての深い喜びを、歩行の研究を通して伝えていけるように、もっと深く「歩いて何なのか」ってことをこれからも追及していきたいと思います。

梶田 いいですね！じゃあ西脇さん。

西脇 そうですね、今浅野さんが知る喜びっておっしゃってて、やっぱり楽しいことやんなきゃっていう佐野先生の話があって。で、僕はやっぱり知るのもすごい楽しいけど、実は思った通りに動くのが実はもともと好きなんだなあって思っていて、それで自分の思ったとおりに動いたものを見せて「すごいでしょ」ってのもたぶん好きなんだと思うんですね（笑）。で、広い意味での制御ってのがたぶん好きで、そういう意味ではそういうふうな事をベースとして続けていけたらいいなあと思っています。実際不整地ってすごい手を出しにくくて、ずっと2足歩行を始めたころからやんなきゃいけないとは思いつつ、ずっとやってなかった課題だったんですけど、ここ数年不整地をうまくいけるようになってきて、だんだんだんだん良くなってきてそういう意味ではとっても個人的には満足してまして、そこがいま楽しいので、ぼくはもうしばらくはこの不整地制御を、歩く制御というよりはそれプラスもうちょっとセンシングとかを含めたシステムとして組み合わせていって、どうだ凄いだろうってのを見せていければいいと思います。

梶田 はい、有難うございます。玄先生。

玄 ヒューマノイドロボット、2足ロボットってのはロボット工学の中でも、稀に見る広範囲な知識を必要として、創造性が要求される分野だと思っていますので、この特性を生かすとしたらやっぱり教育のほうだと思うんですよね。で、野心というか、将来こうなったらいいなと思うのは、ロボティクス学科あるいは、ロボット学科そういう学科のつく教育機関では漏れなくヒューマノイドロボットを必須としてみんなやってゆくと（笑）、それを通じて周辺のいろんな技術を一括してクリエイティブに学生が学習できるようにして、研究者は研究者として継続していければいいんですけど、そこでずっと続けられない人は他の分野にゆくんですけど、その分野でも共通して使えるようなものとかあると思うんですね。研究者はどういう立場かと言うと、実用に向けた研究はもちろん必要なんですけど、もうちょっと次元を高めて、いつでも要請されたら技術を出せるぐらいの、引き出しの中にたくさん技術をもっておくという、そ

れくらいのレベルを目指してやっていければいいんじゃないかと思います。

藤本 究極的な目標は、ヒューマノイドロボットが2足でちゃんと歩いて知能も持って自立で動いて人の代わりになるようなものってのが究極だと思うんですけど、それが将来の高齢社会の時に、まずは、自分が老人になったときに、そういう社会を支えるシステムとしてのヒューマノイドロボットっていうのが目標かなという気がします。

ただ、そこまではかなり技術的な距離もあるので、その手前としてはリモートでちゃんと動いて、転んでもこわれなくて、ちゃんと起き上がってまたタスクを再開できるような、2足というのをもうちょっと大きなメタ的な安定性とか、ロバスト性ってのを考えて、原発問題みたいなそういうところで役に立てるようなリモートのシステムってのもいいんじゃないかなと思っています。

佐野 次回の座談会にも必ず呼んでもらえるように(笑)、第一線で2足歩行ロボットをやっていきたいなと思います。やっぱり、知的探究心の赴くまま、年をとってもはじけた研究をやりつづける、たぶんこれから少し努力しないとそういう方向に行きづらいけど、次回の座談会に呼んでもらえるように頑張るってゆきたいなと思います。

高西 私も、もう50半ばでそろそろこれまでの研究をまとめて言うと、おかしいんですけど、実用にどんどんもってゆかないと本当の意味での未来はないと思っています。マスコミは今まではちょっと試作で作ったものとかでも、興味をもって報道してくれたけれど、今どうしても若い人たちに刺激になるような情報というのが直接いかないようになってると思うんですね。その一つの方向性は今皆さんがやられているような本質に戻ってどうなのかっていうことをやるというのも、すごく重要だと思いますし、これまで長く早稲田でやってきた研究の成果が実用になるという意味では医療訓練のほうにかなり可能性があるんじゃないかと。と言うのは、今の医療訓練はどうやって行われているかという、SP (Simulated Patient) と言って俳優さんとか医学生さんとかに頼んでいるんな病気をまねてもらうんですよ。これは世界中でやられてるんですけどね。例えば診察室に入ってきて「どうしました？」って訓練医が聞くと、「今朝から右手と足がちょっと動きづらいですよ。外に出るとなんかこっちの目が眩しい」とSPが言う。すると、脳梗塞じゃないかということで、「ちょっとここに座ってください」と言って、目を開けるわけですね。本当の脳梗塞だとそっち側の瞳孔が開いているんですが、SPは健康者だからそうならない。つまり、言葉のレベルまでは演技をうまくやってくれるのでいいんだけど、その先がいかないんですよ。そこで、入り口から最後手術台の上までね一つのヒューマノイドが…理想ですよ、すぐには出来ないと思うけど、そういう事を今、一緒にやってる企業と

夢を語りあっています。こっちだと、安全の問題もあんまり言われたいわけですよ。まったく知らない人が使うわけじゃないので。それで、できるだけ機能を増やしていく中で、当然2足歩行も必要だっていうか、色々な脳の病気と歩行の乱れとかね、そういうのはいっぱい関係があるって分かっていて大きい本も書かれています。そういうようなところに一つはやれる道があるんじゃないかということで、これは是非、今後も続けられれば続けたいと。

それに何といっても、ヒューマノイドは大変に複雑な多軸のロボットで本当に歩かせるのは大変なんだけど、まだ、とても理想まではいかなけど、やっぱり、目的とした事がある程度達成すれば、学生達はみんな喜んで卒業してゆくわけですよ。玄さんも言われたけど、そういう意味で格好の教育の題材になっているのは間違いなくて、この方向での研究の面白さを学生に授業とかカリキュラムの中で伝える材料として格好のもですね。デジタルヒューマンプロジェクトとかはそういうのって考えているんですかね？

西脇 人間工学的な側面で、生産現場とか製品設計に役に立つように、人間はこんなふうに物を持つとかがまず最初ですね。行動については、こんな事があり得るよというのを見せるという可視化とか色々やっていますけど、行動のシミュレーションというところはまだなかなか…。将来的には人はこういう場面ではこういうふうに振る舞いますという知見とロボットとのリンクはできることを信じてやっています。

梶田 みなさん、ありがとうございました。非常に面白い座談会になったと思います。次回は15年後くらいにこういう座談会がまたできるといいですね！

謝 辞

本座談会を、日本の2足歩行ロボット研究を切り開き築いてこられた先生方に感謝をこめて捧げます。先生方のお力なしに今日の2足歩行ロボット技術はありませんでした。そして、すでに世を去られてしまった、故加藤一郎教授、故伊藤正美教授、故美多勉教授、故加藤了三教授のご冥福を心よりお祈りいたします。



高西淳夫 (Atsuo Takanishi) 1988年工学博士(早稲田大学), 同大学専任講師, 助教授を経て, 1997年同大学教授. 中国北京理工大学名誉客員教授, イタリア聖アンナ大学院大学学外理事. 2足歩行ロボット, 情動表出ヒューマノイド, 医学教育用ロボット等の研究・開発に従事. 日本機械学会フェロー, 日本咀嚼学会常任理事.



梶田秀司 (Shuuji Kajita) 1985 年東京工業大学大学院修士課程修了(制御工学専攻)。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所。組織改変に伴い 2001 年より独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員、現在にいたる。博士(工学)。



佐野明人 (Akihito Sano) 1987 年岐阜大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、名古屋工業大学大学院工学研究科機能工学専攻教授。受動歩行・走行、歩行支援などの研究に従事。2005 年度計測自動制御学会論文賞・友田賞などを受賞。2010・2011 年度本学会理事、日本機械学会フェロー。博士(工学)。



藤本康孝 (Yasutaka Fujimoto) 1998 年横浜国立大学大学院工学研究科博士課程修了。同年慶應義塾大学理工学部嘱託助手。1999 年横浜国立大学工学部助手。講師、助教授を経て、現在、横浜国立大学大学院工学研究院准教授。博士(工学)。



玄相昊 (Sang-Ho Hyon) 1998 年早稲田大学大学院修士課程修了(機械工学)、2002 年東京工業大学大学院博士後期課程修了(制御工学)。同年東北大学大学院工学研究科助手、2005 年講師。同年 ATR 脳情報研究所研究員。JST 研究員、NICT 研究員等を兼任。2010 年より立命館大学理工学部ロボティクス学科准教授、現在に至る。博士(工学)。



西脇光一 (Koichi Nishiwaki) 2002 年東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年 4 月東京大学大学院情報理工学系研究科科学技術振興特任教員。2004 年 4 月産業技術総合研究所研究員。2010 年 10 月同主任研究員となり現在に至る。



浅野文彦 (Fumihiko Asano) 2002 年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻博士後期課程修了。同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター研究員。2008 年 10 月より北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授、現在に至る。博士(工学)。



杉原 知道 (Tomomichi Sugi-hara) 1999 年東京大学工学部機械情報工学科卒業、2004 年同大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修了。同専攻学術研究支援員、助手、九州大学特別准教授を経て、2010 年より大阪大学工学研究科知能・機能創成工学専攻准教授。博士(情報理工学)。人型ロボットの開発と運動・制御に関する研究に従事。IEEE の会員。