

ハイテク推進セミナー (平成18年11月8日)

ロボットテクノロジーの新しい波 - ロボットビジネスへの道 -



主催 (社)生産技術振興協会
大阪大学生産技術研究会

協賛 (財)大阪市都市型産業振興センター
ロボットラボラトリー

後援 大阪商工会議所
NPO法人 エコデザインネットワーク

<佐々木孝友 事業企画委員長挨拶>

おはようございます。定刻になりましたので、生産技術振興協会のハイテク推進セミナーを始めさせていただきます。私は、企画担当の大阪大学工学部の佐々木と申します。早速ですが、理事長の野村先生からご挨拶をいただきます。



事業企画委員長 佐々木孝友氏

<野村正勝 理事長挨拶>

ただいまご紹介をいただきました生産技術振興協会理事長の野村でございます。司会をいただいた佐々木先生は、事業企画委員長としてハイテクセミナーの今年の計画を立てていただきました。浅田先生には「ロボットテクノロジーの新しい波」と題して素晴らしい企画をしていただきました。生産技術振興協会は、大阪大学と産業界の共同研究などを取り持つ組織で、昭和24年に発足し、毎年、機関誌「生産と技術」を発行しております。本日は70名というたくさんの方々にご参加をいただき、主催者側として感謝を申し上げる次第です。協会の活動については、資料の中に載っておりますので、後ほどご覧いただきたいと思います。最後になりましたが、島津製作所のマルチホールを使わせていただきましたことに対し、お礼を申し上げまして、私のご挨拶といたします。



理事長 野村正勝氏

<浅田 稔 セミナー企画委員挨拶>

おはようございます。大阪大学の浅田でございます。参加者リストを見ますと、一般の主婦の方も来られていて、ロボット技術に興味を持っていただいているのだなと痛切に感じております。ロボット、ロボットとメディアでは踊っていますが、実態と期待とのギャップが大きい分野、業界であります。それでも最近は、そのギャップが狭まりつつあるのか、それとも実態を少しずつご理解いただけるようになったのかなという思いでいます。2011年に梅田北ヤード跡地に新しい街ができるということで、第1区画の中でロボシティコアが実現することになっていきます。ロボットに過度の期待はあるものの、マーケット自体はまだ確立されていません。潜在的には少子高齢社会の中で、ロボットのニーズ、潜在的なマーケットはあるのですが、それをつなげるいろんな工夫はまだ確立してはいません。本日は先生方に5件の発表をしていただきます。現状のロボットテクノロジーがどのようになっているのかを4名の先生方、こうした技術をビジネスにどのようにつなげていくかについて1名の先生、あわせて5名の先生方にお話をさせていただきます。各先生方の講演の後に、10分程度の質問の時間も設けております。本日は長丁場となりますが、よろしくお願い申し上げます。



セミナー企画委員 浅田 稔氏



「複眼全方位センサによる3次元センシング手法」

大阪大学産業科学研究所 複合知能メディア研究部門

教授 八木 康 史

今日のセミナーにはさまざまな分野の方が参加されています。皆さんにご理解をいただけるように、「複眼全方位センサ」という話と、そのベースとなっている「全方位センサ」について、できるだけ分かりやすく説明したいと思います。最初は全方位ビジョンという話に始まり、とくに屈折と反射の光学系を用いたものとはどういうものなのか。次に、複眼全方位という距離が計れる全方位センサ、そのための奥行き計測手法、そして最後にその応用について話します。

全方位センサとは

全方位センサとはどんなものかという、基本的には周囲360度が見られるカメラ。それが全方位ビジョン、全方位センサ、全方位カメラといわれるものです。周囲をぐるりと見るセンサには、さまざまなものがあり、その1つはカメラを回転させることでパノラマ状の映像を撮影する技術です。しかし、こうした回転方式には問題点があり、きれいな映像は撮れるが、周囲360度の同時観察ができません。また、複数のカメラを用いれば、同様の効果はうまれますが、システム全体が大きくなり、重たくなり、ロボットに応用するにも、頭でっかちで歩くのが大変になります。

それに対し、実時間でパノラマの映像を撮る技術として、凸面鏡（反射の光学系）を用いるシステムがあります。

凸面鏡の下にカメラを設置

凸面鏡を用いる方式は、パノラマ映像を撮るのに適している光学系といえます。凸面鏡とはどんなものか。ここに1つの映像がありますが、周りに人がいて、みんなの顔が1つの映像の中に映っている。これが反射光学系を用いた全方位カメラで、凸面鏡の真下にカメラが設置され、凸面鏡に映った映像を観察するという光学系です。凸面鏡の形状の違いによって、性質に違いが生まれます。



双曲面の鏡の下にカメラを置くと性質のよい映像が撮れるというのが、私たちが取り組んできた1つの研究成果です。構成自体は比較的単純で、まっすぐにカメラを立てておくと、世の中に立っているものが放射状に現れます。もっと面白いのは、双曲線がもっている性質からくるもので、ここに描かれているのは二葉双曲線（双曲面）で、この双曲線には、ミラーの焦点が2点あり、反対側に同じような双曲線が仮定できます。一方の焦点にカメラの中心を置くと、非常に美しい性質で映像が得られます。ここで任意の点Pをたどっていくと、鏡で反射し、その虚像をカメラのレンズを介し像面上で物点として見られるという光学です。

この点Pからの線は、点線で延ばしていくと必ずミラーの焦点を通るという性質があり、鏡の形を決めてやると、焦点の間の距離も決まり、入力映像の点が分かれば、カメラの焦点距離を使ってその延長線を考えることができます。



歪みのないパノラマ映像が可能

この延長線はミラーの焦点から見た場合の視線と考えることができますので、入力画像をミラーの焦点から見た映像に変換することができます。すなわち、ミラーの焦点位置から任意の像面を仮定することで、その映像を瞬時に作り出すことができます。後ろや反対側を含め自在につくり出せ、これは非常においしい性質だといえます。当然、放射方向の点をいっぱい持ち込んで並べてやれば、パノラマに展開することも簡単にできます。静止画だけでなく、動画映像もリアルタイムでできます。パノラマへの展開と歪のない映像技術を使えば、例えば御堂筋を車で走っている状況で撮ってやると、映像上であたかも自分が車に乗っているような体感ができます。

パノラマの映像で見せることも、切り出して見せることもできますが、さらに人間の視野に近い状態で見せるようにしてやれば、臨場感が非常に高まります。そこで真横まで見られるヘッドマウントディスプレイをつくってやると、全方位映像の動画から左右の映像を自動的に作り出して、非常に視野の広い映像ができます。市販されているヘッドマウントディスプレイや50インチ程度のモニターでは臨場感が非常に少ないのに対し、人間の視野とほぼ等しい水平視野180度のヘッドマウントディスプレイと組み合わせることで、非常に臨場感のある映像提示ができることとなります。

疑似体験ツアーも可能

こうしたヘッドマウントディスプレイに対して、全方位で入ってきた映像をあらかじめ録画しておいて、録画映像を再生して入れてやる方法もあるし、もう1つは映像をダイレクトに取り込んで、瞬間の映像を見せるようにすれば、いろんな応用が可能です。空を飛んでいるような体感やプロスキーヤーが滑っている体感だって可能です。サンゴ礁を見ながら海中散歩をする体感も可能で、映っている海中の一部分だけをクローズアップで見することもできます。

もう1つはその映像を使い、遠隔でその場の状況が見られます。それはロボットへの応用に関係してくるもので、潜水艦をリモートコントロールで動かすのはまさにロボットの技術になります。安心・安全の面からは、自分の家をモニタリングすることも

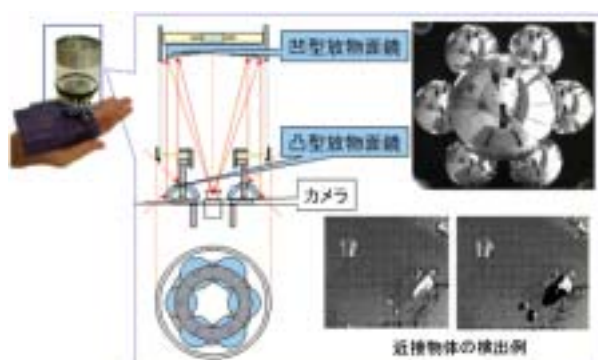
できます。自分があたかもスタジアムにいるような臨場感でスポーツ観戦もできます。

奥行きを全方位で撮るには

今まで話してきた内容は、すべて全方位の方向から入ってきたものをパノラマで見せるとか、ある部分を切り出して見せるとか、全部が「見せる技術」です。ところがロボットへの応用となると、周りの障害物を避けたり、周りの環境を認識する必要があります。映像をとらえるだけでなく、周りまでの距離というのが入ってくるのが望ましいわけです。

奥行きを全方位ビジョンで撮るにはどうしたらよいかの1つの考え方は、複数の全方位ビジョンを用いるというアプローチですが、センサ自体が大きくなります。またロボット自体が動けば、視差が生まれ、その視差によって3次元的な情報が獲得できます。ただ、周りに動くものがあつたりすると、うまく奥行きが出ないという問題があります。

私たちは、新しい全方位の仕組みとして複眼全方位センサというものを提案しました。それは通常のカメラと複数のミラー(鏡)から構成されるもので、1つの大きめのミラー(中央鏡)の周りに6つの小さなミラー(周辺鏡)を装着しているものです。これら7つは凸面鏡です。ここに示している試作例の場合は、放物面鏡ですが、それぞれのミラーに映っている映像は、違った映り方をします。



複眼全方位センサ

マルチベースラインステレオ

皆さんの右目で見ている映像と左目で見ている映像とでは、少し違っているはずで、その違いは視差によるものです。視差が出るというのは、各々別の位置にあるカメラで撮影したということです。7個

のミラーがあることは、いっぱいカメラがあり、各々の間に視差が生まれるということになります。いっぱいカメラがあることをマルチベースラインステレオと呼びます。ベースラインとは、カメラとカメラの間の視点長のことで、いろんな向き、いろんな傾きの組み合わせのステレオがとれていることと同じ話になります。マルチベースラインステレオだということは、安定な奥行き計測が可能というメリットがあります。センサ自体は、ミラーがいっぱいあってカメラは1台ということで、うまくつくり込めば非常に小さくすることができます。

これまでに試作した中で最も小さいセンサは、直径1.5cmの親指程度。こうした長所はありますが、短所もあります。小さくなれば、眼と眼の間の距離が近づくわけで、狭いということは2つの映像が似ていてあまり差がない。特定できる奥行きはある程度限られる。だから遠いものを測ることは適さないことになります。

それと複数のミラーを1台のカメラで撮影するから、1つのミラーあたりに割くことのできる画素数は、ミラーの数だけ減る。空間解像度は当然下がる。解像度が悪いということは、きれいに詳細には見えない。視力5.0と視力0.01の人とを比較すれば、奥行き視覚能力は当然視力5.0の人のほうがるように、物が見えて、物を見つける能力も含めて落ちてくる。こうした欠点を克服するような奥行き計測の手法を用意しないと、こうしたセンサの利点を生かせないことになります。

奥行きを見つける

では、どういう原理で奥行きを見つけるのか。通常のステレオ視では、例えばこの四角が右目と左目のどこで見えているのかをまず見つけた。右目と左目のそれぞれの特徴点を見つけ、その特徴点が同じものかどうかの対応関係を探し、対応がみつかりと視点長に基づき三角測量の原理で奥行きを計算する。こうしたステップになりますが、ミラーの解像度が低い場合に特徴点がとれないことになります。

でも、眼が離れれば視差がでます。対応付けをせずに奥行きを見つける手段として、私たちが行った手法は、次のような考え方に基づく手法です。物体がはるか遠くにあったと仮定すると、眼の位置が横にずれたとしても見え方は変わらず画面の同じ場

所に映し出される。逆に物体が近い場合は、横にずれると映し出される位置が動くという見え方に着目し、物体が遠くにあるとした仮定の中で、視差の発生の有無から、奥行き検出を行うというものです。

明るさの差で奥行き検出

現実的にどんな処理をするのか。具体的には、2つのミラーの映像があったときに、2つのミラーの映像を重ねあわせ、投影像間の差分処理を行うことで近接物体の検出ができるというものです。ただし、これは何m、何cmという正確な距離を測る技術ではありません。ある距離より近づいたか否かを検出するもので、遠ければ差がなく、ある程度近づいたら奥行きが出ます。

ルーカスと金出らの研究に、同じ場所の色の違いを見たときに、色の違いと、その部分での明るさの傾斜から、奥行きを推定する関係式があります。この関係式に基づいて考えると、私たちのカメラの場合、2枚のミラー間で明るさの差が出たら奥行きが検出できたということで、近づいてきたものを判断できるわけです。

これらの処理は非常に高速にできます。明るさの傾きをどの方向で調べるかということ、ミラー同士で見え得る場所の視平面で評価するのが効率的な考え方です。エピポーラ面で評価しています。ミラーが7個あるということは、N台のカメラがあればそのうちの2台を選択する組み合わせになっているため、21通りのステレオの中で考えることができます。

入力画像を階層的にする

検出する奥行きは何で決まるかというと、画像の解像度と大きな関係があります。例えば視力の非常に良い人は、遠くまで見えて奥行きの差もよく分かる。視力の低い人は遠くのものがよく見えなく、奥行きが知覚できないけど、手前のものなら知覚できる。それと同じで、画像の解像度が高ければ遠くでの視差をとらえることができ、解像度を低くしてやると、近くに来ないととらえられない。入力画像をあらかじめ10%や20%というように小さく階層的にしておくと、物が近づいてくるシーンではゲートみたいな役割で奥行きを検出することができるわけです。

例えば800×600画素の解像度ですと、6m程度

では検出できないが、4 m程度になると検出できる。黄色や赤やオレンジなどの色については、黄色が解像度の低いところで検出され、オレンジが中間、赤が解像度の高いところで検出されたケース。黄色が一番近いところで出てくる。近づく、遠ざかるという奥行き表現も可能になります。

人が装着する死角のない監視カメラ

私たちがなぜこうしたセンサをつくったのかというと、ロボットをセキュリティに使うためです。科学研究費の中で実施していますが、携帯型防犯カメラを想定しています。今のところ肩に乗せられる程度の大きさですが、今年はその10分の1程度に小型化する予定です。人が装着し、自分の周りに近づいてくる人を検出できるような技術をつくることにしています。装着者は自分の周りを常に監視することができますわけで、死角がない監視カメラ技術と考えてもらったらよいと思います。その人がどこに行っても、その人の周囲は守られているわけです。それにプラスαが加わると、不審者の発見もできるようになります。

人が装着するには、カメラも小さく、処理するコンピュータも小さくする必要があり、実際に要求される仕様に応じて試作をしています。ここに示した試作は一体型で、ミラーの形状は放物面鏡と、こちら側に凹面の放物面鏡という光学系です。通常のカメラと放物凹面鏡の組み合わせは、まさしく反射望遠鏡です。反射望遠鏡では平行光を1点で結んで物を見るという光学系で、放物面の焦点の所にカメラを置いてやると、平行にやってくる光を像として見ることができます。

凸形状の放物面の場合、放物凸面鏡の焦点を通る光は平行光となります。なので今回の構成により放物凸面の焦点を通る全方位の観測が可能となります。実際には7つのミラーは画面の中では違う位置に映像が映っているのですが、単純に横にずらして重ねてやると、無限円のときの位置というのが一致します。これは平行系のカメラがあるのと同じです。中心をそろえてやるだけでいいという非常においしい性質です。画像を単純に重ねてやると、全方位の映像をつくり出すこともできます。音声やアラームで通知することもできるし、全方位で写っている中で、この辺りから人が来たとか、あの辺りから人が

来たなどと音声で知らせる機能を追加することも簡単にできます。

画素ごとに差を計算し判定

実際の処理としては、画面の中で監視領域を重ねたような映像をつくり、画素ごとに差を基準どおりに計算し、近接物体があるか否かを判定します。そして、近づいてきた人物が不審者とするなら、発見し追跡することができます。従来の監視カメラが固定した状況で監視していたのに対し、こうしたセンサ技術は、ユーザーが装着して監視するという発想のものです。

ユビキタス社会といわれ、いろんなところにカメラを設置するようになりましたが、カメラの設置されていないところで犯罪は起こります。自分を守るためには自分自身が中心になる技術が必要です。最近ではポストユビキタスという観点から、自分の周りを積極的に見ようという機運が出てきています。自分の周りにバリアのようなものを設定し、急接近してくるものが例えばストーカーか否かを判定すれば、危険から回避できることになります。今日の話にないところでは、歩いてくる人の歩行の映像の中から誰なのかという個人認証をする技術も研究しています。

人間もロボットも移動体という意味では同じようにとらえられるわけで、ロボットにもこうしたセンサ技術が適用できればと思っています。今日は、全方位とはどういうものかということと、全方位を使った仮想体験について話しました。また、複眼全方位の考え方について話しましたが、さらに新しい技術を見つけて、できれば自分の子供を含めて守れる技術になったらいいなと思っています。今日はどうもありがとうございました。

質疑応答

<問> 複眼といえば、昆虫の複眼をイメージします。今回の話は昆虫の複眼のメカニズムと何らかの関係があるのでしょうか。

→ (答) 昆虫の複眼とは違うタイプのものだと思います。複眼と名付けたのは単に聞こえが良いだろうと付けさせてもらいました。

<問> 7つの鏡がつながってあって、仮想的に7つのイメージをとって、7C2で21通りということでは

すが、精度はどのくらい上るのでしょうか。

→(答) マルチベースラインというのは、精度より安定性です。カメラの位置関係が上下の組み合わせもあれば、横の組み合わせもあるし、斜めの組み合わせもあります。いろんな向きにできているということは、どんな形でも対応できるということです。

<問> 7C2で21通りを網羅するには、処理の時間はどれくらいですか。

→(答) 階層をつくるという話を含めると、処理速

度は少し落ちます。10階層で120～130mm程度、1階層だけだとフレームレートが15枚/秒程度です。

<問> NHKテレビの番組で、失明した人にサイボーグ技術を導入するというアメリカでの事例を紹介していましたが、そのあたりについて日米の研究の違いはあるのでしょうか。

→(答) 日米の違いはそんなにないと思います。人工的な眼球については、大阪大学で別のグループが研究していると思います。



「空気圧人工筋によるロボット歩行」

大阪大学大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻

助教授 細 田 耕

今回は「空気圧人工筋によるロボットの歩行」について話をさせていただきます。セミナーに参加される方々のリストを拝見し、昨夜、話す内容を少し変えてみました。まず皆さんに今までのロボットの歴史を少し覚えていただいて、その後に私の研究内容について話してみたいと思います。

2足歩行ロボ 始まりは早稲田大学から

日本で2足歩行ロボットの研究を始めたのは早稲田大学の加藤教授でした。すでに亡くなられたのですが、2足歩行に先鞭をつけられました。早稲田大学で最初に2足歩行のロボットを作ったのが1969年。その後、1970年代から80年代に早稲田大学では集中的に2足歩行ロボットが作られていました。当時使われていた動力源は油圧でした。

ここで、早稲田大学のホームページに出ている動画のいくつかを見ていただきます。この映像は最初に作られたWABOTというロボットですが、1973年に既にこうしたことができていました。1985年のつくば万博では、日立との共同研究により油圧で歩行距離40kmに達するロボットも開発されました。90年代までにはいろんなロボットが作られ、階段を昇降するロボットもできていました。加藤先生が亡くなられた後、高西先生が引き継ぎ、WABIANというヒューマノイドの研究をされるようになりました。

これに対し、ご存知のホンダはどんな歴史があるのでしょうか。早稲田大学が1969年にロボットを作り始め、80年代には2足歩行の技術を獲得した。ホンダが2足歩行ロボットを作り始めたのが1986年ごろといわれています。試作を重ね、ASIMOのプロトタイプが96年で、現在の形になったのが2000年ごろ。ホンダの場合はずいぶん後発ということです。ASIMOに関して皆さんは、テレビのコマーシャルでもご覧になっていると思いますが、非常によく動いています。



走行ロボ 草分けは米国・MIT

歩行ロボットの草分けは日本の早稲田大学ですが、走行の草分けはアメリカ・MIT（マサチューセッツ工科大学）です。ここでMITで行われた走行の歴史を紹介します。立ち上げはレッグ・ラボのマーク・レーバートという先生が始めたもので、1983年に一本足のポッピングロボを作った。これを二本足にし、89年～95年まで映像にあるようなロボットを作っています。外を自由自在に走ることができたり、宙返りをするロボットが90年にはできていました。1990年の走行に関する著作は、他の研究者がとりつくことができないくらいの研究成果だといわれています。

年代的にみると、1983年からスタートし、90年代に入るとロボットは歩いたり、走ったりしていた。人間は歩くことと走ることの両方ができるわけで、ロボットにもその両方をさせたいくなるものです。しかし、そこにはギャップがあります。歩行の場合、足は硬いほうが良く、例えば足の先にばねが入っていると一歩踏み出したときに体が沈み、コントロールができ難くなります。走行の場合は、足の方に（直列に）ばねが必要になります。だから歩行系の研究者と走行系の研究者とでは、ぜんぜん違う対象を相手に研究を進めてきたのです。

とはいえ、最近では両方をゴリ押的に進めようという研究の流れが大勢を占めるようになっていきます。もともと歩行系だったロボットが、走行もできるようになったものは、ホンダのASIMO、産業総

合技術研究所のHRP 2, ソニーのQRIOの3つだといわれています。

研究の流れは歩行・走行 両方向へ

TVのコマーシャルやインターネットの映像を見ると、常にスムーズに走行しているようです。次の映像は産総研のロボットで、電気モーターで動いていますが、モーター部分にばねの要素を実現しようとしています。残念ながらQRIOは生産中止になってしまいましたが、基本的にやっていることは同じで、モーターの出力を上げて走行できるようにしています。産総研のロボットやQRIOの動きを見ると、人間が全力疾走する動きとイメージが少し異なっています。

どこがどう違うのか。何とか人間のように走り、人間のように歩くことができないのかというのが、私たちの研究の動機でした。重要なのはモーターではなく、筋肉の部分ではないのか。人間の関節を動かすための筋肉は、基本的に曲げる筋肉と伸ばす筋肉の2本がつながってついています。互いが拮抗することにより、緊張すると硬くなり、緩めるとやわらかくなる。電気モーターを動力源とするロボットは、このような仕組みを利用しているといわれています。

例えば歩行の場合は、足を伸ばして筋緊張を高めることによって、あたかもバネがないように扱うことができるし、走るときには緩めることでバネの要素を使う。もう1つ、電気モーターで不服に思う点は、爆発的なパワーがないことです。地面を蹴ってジャンプするためにはかなりのパワーが必要で、爆発的なパワーを与えてくれる何か、モーターに代わるものはないものかと私たちは研究を進めています。

空気圧人工筋を使ったロボットづくりへ

映画「アイロボット」に登場するロボットは、空気圧のアクチュエータをモデルにデザインされています。私たちのグループでは、このようなタイプの人間的な動きをする、筋肉を持ったロボットを作ろうと研究を進めています。使っているのはMcKibben型人工筋です。原理は非常に簡単で、ゴムチューブにスリーブといわれる網をかぶせたような構造になっています。これに空気を入れたり抜い

たりすると、伸びたり縮んだりする。これを利用してやれば、たっぷり空気を入れるとカチンカチンになるし、完全に抜くと、ぶらぶらになる。空気を少しだけ入れるとバネのような特性があり、人間の筋肉のような特性も出せるわけです。

私たちは、この空気圧人工筋を日立メディコから購入しています。そのほかにイギリスのシャドー社が同じようなタイプを販売しているし、ドイツのFEST社が似たような空気圧アクチュエータを扱っています。日本でも昔、プリヂストンがラバチュエータという商品を80年代に販売していましたが、既に撤退しています。

この人工筋を使い、2足歩行のロボットを作ってみました。その中の3体の動きを今からビデオで紹介します。これはベルトコンベアの上を歩いているところです。形状はASIMOやQRIOに比べ非常にシンプルですが、このように人工筋で歩行することができます。これは真横から見ると2足歩行ですが、2次元歩行といい、横方向に倒れないようになっています。次は3次元歩行に拡張したロボットです。これは足首、股、手の部分に人工筋肉がついています。

次のビデオを見てください。これも同じタイプのロボットですが、さらに安定して歩いています。今のところ、空気は外側から供給しています。ロボットが完全に自立できるように、CO2のボトルを載せるような仕様になっていて、10分程度の歩行が可能です。コントロールするためのコンピュータや空気圧の弁など、空気源以外の全てはロボットに搭載されています。

コントロールが難しい

空気圧のロボットは、これまでに存在しなかったのでしょうか。調べてみると、じつはありました。早稲田大学の加藤一郎先生のところで、先ほど紹介した2足歩行ロボットの以前に、空気圧のロボットを作っていました。空気を入れると膨らむ、空気を抜くと縮むという同じ原理で、2体ほど開発されています。ただし、2体ともコントロールが非常に難しいことから、すぐに撤退して、先ほど紹介したような油圧に代わっています。1998年にはイギリス・サalford大学のカルドウェルという人が、2足歩行の人工筋肉のロボットを作っています。し

かし、コントロールが難しいということで、やはり撤退しています。

ブリュッセル自由大学に「ルーシー」というロボットがあります。私たちとは違うタイプの人工筋肉を使って2速歩行を実現しようと、研究をしています。動きを見ると歴然なのですが、どちらかといえばASIMOやQRIOに似ていて、与えられた軌道にできるだけ追従するように制御するタイプです。空気圧の何が難しいかというと、油圧に比べ空気圧は圧縮性があるので、例えば足の先を正確な位置にもって行くことができ難い。コントロールという意味では非常に厄介。それと摩擦が大きい(ヒステリシスが出やすい)ことが難題です。

受動歩行という考え方

それでは、私たちのグループがなぜ2足歩行のロボットができるようになったのか。それは受動歩行という考え方があったからといえます。カナダのタッド・マックギールという人が受動歩行という現象を見つけられました。受動歩行の玩具を見られた人もいると思いますが、軽い下り坂に玩具を置くと、カタカタカタと勝手に歩いて落ちる。それと同じ原理で、ロボットには一切モーターがついておらず、少し前側に投げてやると斜面の床をロボットが勝手に自然に歩いていく。彼は、ロボットの重さと慣性を最大限に利用してやるとモーターはいらないと主張しました。これは2次元歩行といって横に倒れないタイプですが、アンディー・ルイーナという人がコーネル大学で学生と一緒にやった研究が、3次元の受動歩行です。ロボットの質量や慣性について、

上手に設計してやればよいということです。

その後、受動歩行に少しばかりの推進力を加えれば平面で歩き続けるのではないかと、研究が始まりました。オランダ・デルフト工科大学の研究では、私たちと同じ空気圧アクチュエータを使ってロボットを作っています。私たちも受動歩行を利用すればよいだろうという所まではたどり着いていたのですが、それに空気圧の人工筋肉を組み合わせるまでには至っていませんでした。

デルフト工科大学で歩行に成功したという話を聞き、私もオランダに行きロボットを見せてもらい、その考え方に感心しました。彼らの研究目的は、どちらかという受動歩行をどのようにさせるかという点で、拮抗機能になっていない。空気圧アクチュエータが推進方向の一方だけについていて、反対側についていない。だから、歩くことはできるが走ることができない。私たちは、歩くこと、走ることの両方を思考していたのです。

歩いて走れる「空脚 - R」

あらためて私たちの作ったロボットについて話を戻します。2004年に「空脚」という名のロボット、2005年には「ニューマン」、2006年には「空脚 - R」というロボットを開発しています。空脚 - Rは、初の歩いて走れるタイプのロボットです。基本的には平面2足歩行で、走行の場合には地面を蹴ってやる必要があることから、足首の部分に空気圧の人工筋が着いています。工学的には、歩行は走行と同じ弾性の空気圧を使っています。だから歩行が少し固い感じです。もう少し筋肉をリラックスさせてやると、やわらかく歩いてくれると思います。

歩行が確認できたので次はジャンプです。空気圧アクチュエータはかなり強力なので、20mm程度はジャンプできます。ここまできたら次は走ろうということで、走行をやってみました。今のところ、フィードバックがかかっていません。空気圧のアクチュエータはコントロールが難しく、コントロールをしようとする瞬間に、うまく動かず壁にあたる。私たちがやった方法は、コントロールすることは諦めて、プログラミングでどこまでできるかをやっている。そのため2～3歩で止まってしまう。ただし、いろんなフィードバックを加えていけば、安定化できるのでと実験を進めています。



McKibben型人工筋を用いた二足歩行ロボット

一連の実験を通して、歩いて走れるというロボットまで、何とかかたちになってきたと思います。歩いて走れるようになるには、引っ張りによる空気圧人工筋駆動が非常に重要だと考えています。ただし、1つ不満なのはこのロボットは足だけで上体がないということでした。上体があるとないとは、歩行に関しては大きな差があって、そこには大きなギャップがあります。

人間型2足歩行ロボットが完成

人間が2足歩行するとき、上体をどのように支えているのかを考えるべきだと、私たちが次に取り組んだのが人間型の2足歩行でした。今回のセミナー資料の表紙に載っていますが、今年4月に完成したばかりです。「ニューマット-BP」と名付けていますが、空気圧拮抗駆動全身型の2足歩行ロボットです。2本の足を持っていて、足首に筋肉、それと上体を持っている。空気圧関係の制御装置、コンピュータも載っている。空気源だけが搭載されていないだけで、空気源もCO₂のカートリッジを使うと、何とかできるのではないかと考えています。

基本的には今までの考え方と同じで、受動歩行の性質を利用しています。人工筋による拮抗駆動がよく効いていて、空気はある程度入れておくと上体は立つわけです。片足に乗ってから次の足に乗るときに、足の拮抗駆動に力を入れてやればよいので、受動歩行の性質が無理なく利用できることになります。また、このロボットについているセンサは2つだけで、足先のオン・オフのスイッチのみ。歩かせてみると、平坦ならずっと長い距離を安定して走行できます。このように空気圧拮抗筋を使うと、早稲田大学やホンダの2足歩行ロボットのように固い歩行ではなく、やわらかい歩行の実験ができるのではないかと、私たちは研究を進めています。また、歩行だけでなく、走行や跳躍もできると期待できる素材だと考えています。一方で、精密な制御ができないのが現状で、新たな方策を考えることが必要だといえます。

さらに私たちがやってみたいのは、人間との比較をすることです。人間の計測データと比較することで、これまで人間のメカニズムとして分かっていたことを、このロボットを通して理解できるのではないかと考えています。また、人間が歩いてい

るときに足裏に出てくる力のパターンと、ロボットの足裏の力のパターンを比較して、このロボットの歩行がどのくらい人間の足によいのかを評価しようという研究を現在進めています。

私たちの研究では、今回紹介できなかった非常に細かい制御のテクニックやノウハウを含め、多数のロボットを作っています。それらはすべて私でなく、学生、研究員の人たちが頑張ってくれているお陰です。この場であらためて感謝し、この講演を終わります。

質疑応答

<問> ロボットを動かす人工筋自体の研究の状況は、どうなっているのでしょうか。

→ (答) 人工筋肉の研究は盛んになってきていて、さまざまな人工筋肉が提案されています。SRIで開発されているEAPアクチュエータは、シリコン樹脂の上下に電極を挟み、3,000ボルトの電気を入れるとキュと縮み、横に広がる。広がった力を利用すると、人工筋肉と同じような動きのユニットを作ることができるようで、2.5ボルトのボタン電池から3,000ボルトをつくること可能だということです。ほかにも電流を利用したポリマー、形状記憶合金などによる研究も進んでいます。しかし、放熱問題がボトルネックになっています。

<問> 2足歩行ロボットは倒れないようにしなければならないと思うが、技術的には成熟しているのでしょうか。

→ (答) 2足歩行の安定化技術は、電気モーターを使う分野では研究段階がある程度終わったと考えてよいと思います。しかし、歩行するにはその安定を崩して、前に繰り出すことを繰り返します。私たちのロボットは、進み続けないと倒れるわけです。そういう意味からは、動的安定性の研究は引き続き研究が進むと思います。とくに歩行から走行に移るところの研究は、今後のトレンドだと思います。

<問> 2足歩行ロボットは非常に華やかな印象がありますが、今後の産業界においてどんな役割を担っていくのでしょうか。

→ (答) 私的見解では、走るなら車輪を使えばよい

し、ゆっくり歩くなら別のメカニズムを使えばよいわけで、2足歩行は多分に人間の知識欲に根ざしていると思います。産業界にイノベーションを起こすかと聞かれても、私には思いつきません。私たちの研究は、人間のメカニズムに興味があるからで、人間の歩行の解明につながっていくと思っています。

<問> ロボットのひざや足首の関節のメカニズムは、人間にどれくらい近づいたのでしょうか。

→ (答) ロボットを作る立場としては、関節1つに対し2つの筋肉をつけるだけでよいわけです。しかし、人間の場合、2つの関節にひとつの筋肉がついている2関節筋というものがありま

す。ロボットに筋肉を着けるという構造は、じつは人間のものとは随分違い、メカニズムがかなり異なっています。そのあたりの問題については研究中の段階です。例えば人間の場合はひざを曲げると、自動的に足首も曲げられ、上体の姿勢が保たれる。人間の関節の位置と筋肉の着き方のメカニズムを模倣することによって、違った設計になるのではないかという考え方はあります。そういう意味では、筋肉を使うという発想は同じでも、そのメカニズムはまだ随分違うと理解してください。



「不確かさを考慮した移動ロボットの環境認識と行動計画」

大阪大学大学院工学研究科 機械工学専攻

助教授 三 浦 純

本日は、私の主な研究分野である移動ロボットの「環境認識」とどのように動くかの「行動計画」について話をさせていただきます。認識にも行動にも不確かさがあるので、そういうことを考えたうえで、安定して移動するにはどういうことをすればよいのか。ロボットの近未来像として私は、ユーザーの指示でいろんな作業をしてくれるロボットを実現したいと思って研究をしています。細かい指示なしで動いてくれるといいわけです。そのためにはいろんなことができないといけません。ロボットに必要な機能の1つとして、「人間の生活空間を自由に動き回ることができる」のは不可欠なことだと考えています。人間の生活空間の中で、今回はおもに屋内を対象とした話をさせていただきます。

ロボットが自由に動き回るためには、何をどのようにしなければならぬのか。1つ目は通れる場所、どこを動けるかの自由空間の認識。2つ目はどこにいてのかの自己位置の認識。3つ目はどこへ行けばよいのかの行動計画。この3つを考える必要があります。

自由空間の認識が不可欠

最初に自由空間の認識ですが、通常われわれが動いている空間は、例えば地図があったとしても、存在する全ての物体が記述されているとは期待できない。だから自由空間の認識は不可欠です。さらに移動物体がある場合の認識も必要になってくる。一方、ロボットが動き回るには、周りを広く見ることが大事であろうと思います。

距離を測る方法は大きく分けると3つぐらい。1つは超音波やレーザーのように信号を出して、返ってくるまでの時間を測る。超音波は広く使われているが、分解度はそれほど高くない。レーザー距離センサは高精度に測ることができるが、時間がかかる。それに対して三角測量を基本としたやり方としてステレオ視。これは計算量が多いものの、距離だけでなく物体の見えなども同時に獲得できる。移動ステ

レオの場合は動きながら相手の見え方の違いから距離を測るが、移動の時間がかかる。パターンを投影しカメラで観察するという方法もあるが、距離の限界がある。一方、焦点が合っているかボケているかということで距離を測る場合もあるが、測るたびに焦点を移動することなどが必要となる。この中ではやはりステレオ視というものがよいと考えて使っています。

ステレオ視を使う

通常のステレオ視だと、カメラを左右に置き、その対応点を決めて三角測量によって距離を出す。通常のカメラでは視野が狭い。そこで広く見るためには全方位を見ることができるカメラが役に立つだろうと、私たちはこれを2台使ったステレオ視を移動ロボット用に開発し、全方向の距離を出すために使っています。

原理を簡単に紹介します。上下のカメラの画像をパノラマ画像に変換する。これで通常の2台のカメラを上下に並べたのと同じようになります。この垂直線上に対応点を見つけることで距離を計算することができます。その結果、全方位の距離の獲得ができる。明るいところが近く、暗いところが遠いということになっています(図1参照)。実際にこれを移動ロボットに載せて、移動ロボットのコンピュータで処理していく。そこに人が歩いていきますと、対応するあたりに白っぽい形で出てきて、このあたりで動いている。この処理はソフトウェアでやって



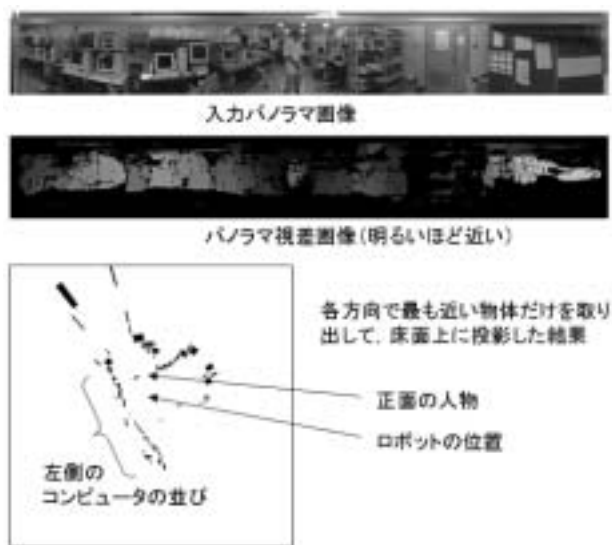


図1 視差から距離への変換

いて、現在のシステムは2ギガ程度のコンピュータで1秒間に10枚程度のデータを取ることができます。

ここで得られるのは視差のデータです。実際にロボットが動くための自由空間をつくるということであれば、どの方向にどんな物体が、どれくらいの距離があるのかを考える必要があります。ここでやっている方法は、このパノラマ画像の横軸は方向に対応しているので、各方向で一番近い物体を見つけてきて、それを床面上の2次元に投影します(図1参照)。ここに人がいて、それはここに相当し、コンピュータが並んでいるのは大体このあたり。これで基本的に自分がどこにいるのかが分かります。それを使って安全な方向を見つければいいが、やはり問題があって、1つは距離のデータの誤差。これは主に画像のピクセルの解像度の限界によります。もう1つはステレオ技術を使っているので、対応点の間違いがあると、変なところに距離が出てしまう。こうした不確かさに対処するために、複数のセンサ情報を統合するというアプローチが必要になります。

センサ情報を統合する

センサ情報を統合することについて少し触れたいと思います。単一のセンサを何回も使い信頼性を上げる。同じセンサをいろんな場所に設置し、センサの信頼性を上げる。異なるセンサを持ってきて、それらを統合することで信頼性を上げる。いろんな軸

がありますが、これらを総称してセンサフュージョンと言い、重要なものとなっています。

センサフュージョンの事例の1つとして、移動ロボットのための地図をつくるときに使用される方法として、占有グリッドというものがあります。これは地図を細かいセルに分割し、各セルに障害物があるかないかの情報を貯めておく。不確かさを考える場合には、セルに物体が存在する確率はどれくらいかを計算していく。いろんな場所で得た情報を1枚の地図に統合することで、例えばこんな地図ができる(図2参照)。これはロボットを中心とするある範囲の地図ですが、白いところは確率が1または1に非常に近い、黒いところが0または0に非常に近い。グレーのところは1と0の間。白いほど確率が高いということになっています。例えば0.1であれば確率が低いということで、安全だという使い方ができます。

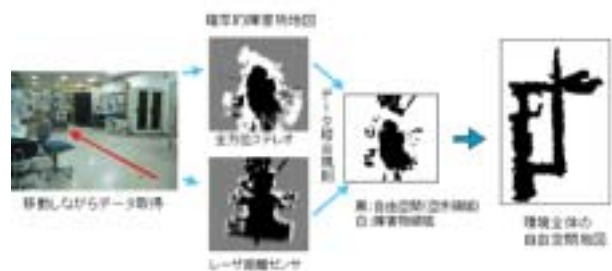


図2 全方向ステレオ視とレーザー距離センサを統合した自由空間地図生成

その原理ですが、ある場所で、ある方向に何かが見えたとして、そこに物があるという情報が得られる。もう1つ、そこに物が見えたということは、その手前には物がなかったという情報を得たことにもなる。物体が存在したという事象と物体が存在しなかったという事象を使い、障害物が存在するという条件付き確率を計算する。存在しなかったことに対しては、存在しなかったことで確率を計算する。障害物の後ろは、情報はなかったということで更新しない。これらのデータを統合するためには、ベイズの定理(条件付き確率の計算式)を使います。

そこで必要なのは、センサの不確かさのモデルを使い、実際に障害物があったとしても、障害物があると観測される確率はどれくらいか、障害物がなかったとしたときに、そこに障害物が観測される確率はどれくらいか。この2つのモデルが必要となります。それはセンサごとに決めていく必要があります。

ステレオ視の場合ですと、1つは距離が離れると信頼性が落ちるというモデルを使います。ただ非常に近いところは視野が限られるから少し低めの値にする。次に、物が無いのに物があると思ってしまうのは、対応の間違いがほとんどだから、対応の間違いの確率を適当に見積もってやる。

別センサを組み合わせ、地図をつくる

1つの全方位ステレオというセンサを使い、地図を作ってある程度移動することは可能ですが、センサにはそれぞれ限界があり、1つのセンサだけでは不十分な場合があります。それが次に示す事例です。ステレオというのは、2つの画像の中の対応をとります。真っ黒のところは特徴点がないので、対応付けが分からない。距離がうまく出ないか、間違っている可能性が高い。これに別の種類のセンサを組み合わせると、お互いに補い合って信頼性を増すだろうと考えています。ここで私たちが使っているのがレーザー距離センサです。

現在よく使われているレーザー距離センサというのは、いろんな方向へレーザーを飛ばして反射光が返ってくるまでの時間を計測することにより、ある二次元平面上の前方180度の範囲の距離を測ることができる。どんな色をしているかは関係なく、物があると返ってくる。すると、例えば机に対して、少し下のほうへ行くと机の脚だけを見てしまう。脚と脚の間隔が広いと、通れると思って行ってしまう可能性があります。それに対してステレオのほうは、しっかり見えているので物があるというのが分かる。これらのセンサで作った地図を組み合わせ、補い合うことでより信頼性のある地図をつくることができると、私たちは考えています。

ただ、組み合わせ方は少し考えないといけない。例えば、机をステレオのほうは「ある」と判断し、レーザーのほうは「ない」と判断したとき、確率を足して2で割るようなことをしてしまうと問題があり、下手をすると、「ある」のに「ない」と判断してしまうこともある。私たちがとった方法は、まずそれぞれで障害物があるかないかを決めて、どちらかが危ないと言った場合は、危ない。両方が分からないといった場合も、危ないとしています(図2参照)。

移動障害物を見つける

次に移動障害物を見つけるという話をします。いくつかのやり方があると思いますが、1つは自分の動きが完全に分かれますと、それをキャンセルすることによって、前回と今回のデータの比較から、止まっているものは止まっていて、動いているものは動いているとわかるはず。ただし自分の動きを完全に知るのには難しいので、偽の動きがたくさん出てしまうこともある。私たちはしっかりと自由空間として認識できているので、そこに入ってくるものを候補として見つけ、それを何度も追跡して何回か連続して観測できれば、物があると判断します。もう1つ、実際に追跡するにあたって、いくつかの候補が出てくる場合がある。例えば2人の人がすれ違う場合にもおこるのですが、どちらの可能性も捨てられないときには、とりあえず両方を追跡し、偽のほうはそれが分かったら捨てる。基本的にはこのような戦略をとっています。

これは実験の映像です。ロボットが移動していて、周りを2人の人が動いて、ロボットから見て人が重なったりする場合がある。そんな場合でも動きの連続性を仮定すると間違えることもなく追跡できる。これはロボットからの視点ですが、動きながらどういう人が動いているかを見ることができる。こうしたことを使って実験をしてみました。人が後ろから来る。後ろにも眼があるから、それを見て少しよける。動きとしては微妙ですが、中の計算ではどちらへ行くかの予測を立て、それに対して絶対に安全な方向はどちらかを計算したうえで動いています。

自己位置の認識 移動量を推定する

次に自己位置の認識の話について話します。自己の位置を認識する方法には大きく分けて2つあります。1つは絶対的な位置を決める、あるいは何らかの基準に対する位置を決める。もう1つは、どれくらい動いたかの移動量を推定し、それを積分することで自分がどこにいるかを判断する。絶対位置で最も使われるのが屋外ならGPS。それと屋内、屋外を問わず何らかの地図。その地図にどんなものが見えるのか、視覚のランドマーク的なものを書いた地図があると、それが今どちらから見えるかを考えると、ロボットの位置を推定することができます。もう1つ、移動量の推定では、1つはデッドレコニングと

いって、内界センサ、つまりロボットの中にあるセンサだけでどれくらい動いたかを測る。もう1つは外界センサといって、外の世界を見るセンサ、例えばカメラなどを使い、移動することによって世の中がどう変化したかの変化量から、自分の変化を知る方法です。

外界センサによる自己移動量の推定

ここでは外界センサを利用した方法を説明します。この方法には大きく分けて2つあると思います。1つは特徴点の対応に基づくもの。例えば画像センサ、あるいは距離の出るようなレーザセンサから特徴点を見つけ出し、前回と今回のデータから対応をとる。それがちょうど合うように自分が動いたという計算をするわけです。

もう1つは距離のデータが得られたときに使う方法であるスキャンマッチング。これは全距離データを対応付けする。そのとき、データは基本的には近いものを選んで対応を取り、それが合うように移動量を推定する。そして対応を付け直し、何回も繰り返して最終的にうまく合うようにする。これは比較的単純な環境では有効だが、もっと細かいものがあります。もう1つの問題は、移動量を推定したときに、どの程度正しいのかが分からなければならない。不確かさが大きい小さいかを明示的に見積もったほうが、行動計画上でも安全性や信頼性の意味から重要だろうということです。

そこで私たちがやっている方法を紹介します。いろんな移動量に対して、どの程度合っているかを計算してみて、適合度分布図のようなものをつくる。廊下の環境でやった事例では、廊下に沿った方向に谷ができる。この谷のどこでも合っているということは、どこにあるかを決めるのが難しい。だから解析して不確かさの範囲を決めてやる。さらに、これを複数位置での距離データのいろいろな組合せに対して行い、それらを全部統合することによって、すべての移動量推定をよりよくすることができます。

スキャンマッチングを用いるとき、初期位置が与えられていれば自分がどこにいるかをある程度推定できる。ただし、最初どこにいるのかが分からない場合は、それなりの処理が必要で、そのために使われる1つとしてパーティクルフィルタによる位置

推定があります。これは不確かさを1つの確率分布であらわすのではなくて、重みを持った多数の点の集合として表す。少し動きながら実際の観測と地図から予想される観測とを比較しながら、より信頼性のあるものだけを残すという処理をすると、少し動くことで1つ1つの仮説が集まってきて、最終的には集中してくることが示されます。

行動プランニング

つぎに行動について計画する、行動プランニングについて話します。動くと考えた場合、主に2つのことをやればよいと思います。1つは目標の位置が分かっているれば経路を選択する。もう1つはどんな軌道でどんな速度で動いていくかを制御するためのコントロールの問題です。実際にロボットが動くときには周りとの物体との相対的位置を確かめながら進んでいくが、そこには当然誤差がある。すると、例えば皆さんが車を運転して狭い所を通るときは、ゆっくり動きながら確かめつつ進みます。それと同じようなことをやらないといけな。何度も観察すれば精度は上る。ただし、ゆっくり動かないといけな。それに対し、速く動くと誤差が増え、安全性が低くなる。戦略としては、狭いところはゆっくり動き、広いところは速く動く。問題はどんな定式化をし、それを自動的に決めていくかということです。

そこで選択の基準を考えます。ある目標軌道があり、現在ある位置にいとすると、そこから動くときの誤差である範囲内へ行くと予想されます。軌道から一番離れた位置(最悪位置)を想定し、そこから目標軌道に障害物にぶつからずに安全に戻るかどうかを安全の基準とする。そこで戦略として、最悪の場合でも安全に戻ることを条件として、次にどこで観測すればよいかを選ぶようにする。このときにセンサの情報をとって処理する時間が一定であるとする、観測点の間隔を決めるということは、実質はロボットの速度を決めていることになる。だから近くで見ると判断したときは、ゆっくり動く。遠くで見てよいとなれば速く動くことになります。

もう1つは、さきほどの地図をつくるという話にも出てきましたが、地図には不確かさがある。あるところは安全だということが分かっていますが、十分に観測されていないところは大丈夫かどうか分からない。そこで不確かなところはもっと観測を重

ねれば、より確かになっていくだろう。十分な確かさを得るためにはどれくらい観測が必要かを考えて、それを満たすようにする。そうすると、結果として出てくる行動は、不確かな場所が手前にあると、その前で少し減速をするということになります。見通しの悪いところに入るには、入る前に少し減速するということです。これまでに述べてきた処理を全部行って、未知環境での自律移動実験を行ったものが図3です。

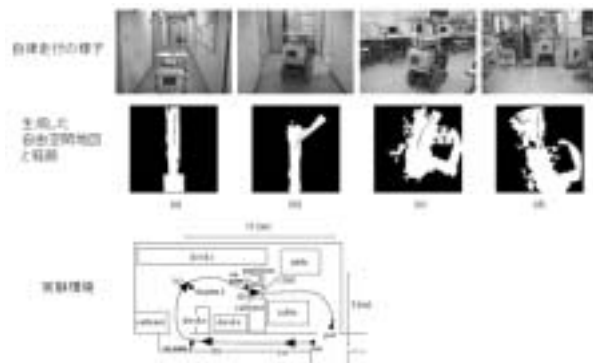


図3 地図と移動の不確かさを考慮した速度選択

まとめ

本日は、ロボットが日常空間を自由に移動するために必要な機能として、自由空間の認識、自己位置の認識、行動プランニング、この3つについて簡単に紹介しました。この中で1つのキーワードになっていたのがセンサフュージョンという言葉でした。さまざまな位置で、さまざまなセンサで得たデータを統合するということですが、そこではいろんな意味での不確かさがあり、それをモデル化して、統合していくことが重要だろうと思います。

質疑応答

<問> 2足歩行ロボットの研究をしていて、上にカメラを積むとものすごく揺れる。そういう中での認識地図というのは、車輪のものとは変わってくるのでしょうか。

→(答) 変える必要はないだろうと思います。人間の思っている地図とモデルとは似ているのではないかと思います。細かい凹凸が分かるということより、どこに何があるかということがいちばん大事なことはないのか。また、揺れに対処する工学的方法の1つは手ぶれ補正をするということだと思います。

<問> 私は車の運転で、狭い所を通れるかどうかを認識したら、左のミラーを見て車を左に寄せからアクセルを踏みます。通れると分かってしまえば、それ以上の情報はいらないのでしょうか。車は急に横に移動できないことを上手に使っていると思うが、ロボットの移動能力に照らし合わせて、行動の誤差のルールもそのモデルには入っているのでしょうか。

→(答) モデルとして入っています。ある軌道をとるためにこういう回転数で車輪を回せ、というように指令は出しますが、実際には指示通りに動かない状況があります。そのとき、車輪の部分の動きのずれがロボットの目標軌道からのずれにどのように反映するかを考えて対応しています。また、左側によって進めばよいというのは、戦略のレベルです。どういう軌道をとるのかの戦略は決まっても、結局移動時の不確かさがあるので、周囲の物体からの位置や地図の状態を考慮して、適切に速度を選択することは必要になります。

「ロボット産業化に向けた動き」

(財)大阪市都市型産業振興センター

ロボットラボラトリー リーダー 石 黒 周

まずは私のプロフィールからお話しします。大阪で昨年、ロボカップが開催されました。ご存知のように大阪大学の浅田先生は2002年からロボカップのプレジデントです。その前のプレジデントは北野宏明氏(現ソニーコンピュータサイエンス研究所副所長)でした。北野氏が1999年からERATO(戦略的創造研究推進事業)という国のプロジェクトの統括をやっていたのですが、私がロボットに最初に触れたのはそのプロジェクトに参加したときで、今から6~7年前のことです。私は元々実業界の人間ですので、北野氏や浅田先生とのお付き合いの中で、研究成果やハイテクからいかに事業を起こしていくかに携わってきました。

次世代ロボットの定義

今日の私のお話の中で、皆さんと共有しなければならない非常に重要な点、それは次世代ロボットの定義です。私は次世代ロボットの定義を「人に代わってあるいは人と協調しながら、人によりよい生活を提供するシステム」としています。

次世代ロボットについては、少し緩やかに広くとらえる必要があります。ネットワークロボットというのがあり、総務省などが後押しをしている。パーソナルロボットと呼ばれるものは、例えばその中でも手も足も体もなく、そんなものもロボットと呼んでいるわけで、私の定義はそれほど無茶でもありません。いま言った定義の次世代ロボットは、必ず巨大な産業になるだろうと考えています。



その根拠ははっきりしています。少子高齢化、若年労働者の労働意欲の減退。若年労働者は労働意欲が高まる可能性はあると思いますが、少子高齢化がなくなる可能性は先進国、とくに日本はあり得ません。この会場に来られている方々はここ20年、30年の間、豊かな生活を経験してきました。そうした方々を支えてくれる若い人がいなくなり、自分たちは消費をするだけの側、しかも体が不自由になった時代を迎えたときに、貧しい生活に戻るのも仕方ないと思う人はゼロでしょう。

豊かな生活に対する願望が今以上に強くなる。そんな環境にあるわけです。これは必ず来る未来です。そして同時に成熟した市場の全て、日本をはじめ先進国のほとんど全てでニーズが多様化して、それぞれの人々が求めているものが変わってきている。例えば隣の人々がこれを買ったから、うちも買おうじゃなく、うちはやめようという時代。個別の満足を満たしていく顧客多様化(個客)時代が続くことになります。

課題解決の方向性

これが必ず来る未来だとしたら、解決する手段の1つは労働生産性を劇的に上げることです。しかも人間でなくてよい、人間でないほうがよい、それらの代替手段を見つけていかなければならないわけです。3Kの仕事を若い人がやらなくなっているし、その若い人の数が減ってきている。もう1つは個客とのインタラクション。それによって満足させればお金を出すという人は不況の時代でもありました。そういう環境にあるといえます。

その課題をどのように解決するのか。先ほど示した次世代ロボットの定義は、その課題に合わせて話したわけではありません。次世代ロボットを広くとらえるとすると、こうした課題を解決する手段の中心になり得ると思います。これが、次世代ロボットが巨大な産業となる可能性を持っていることの根拠です。

労働生産性を劇的に上げる必要があるわけですが、肉体労働部分を代替手段によって置き換えていく、すなわち労働を自動化していくわけです。これは工場の生産ラインではすでに行われています。このマーケットすなわち、世界の産業用ロボットでは日本は世界の6～7割を占めています。

この労働生産性の向上の対象が工場の生産現場からサービス業やメーカーのサービス部門にシフトしようとしている。労働生産性を劇的に上げる通常のアプローチは、作業プロセスを縮約する。例えば、今のやり方や、システム内ですと、あることを実現するプロセスが10のサブプロセスからなっているとしたら、その10を3にすることができるかどうか。できるとしたら自動的に生産性は3倍以上に持ち上がります。ある意味で当たり前なのですが、その当たりのアプローチを次世代ロボット産業化に対してやっているのかどうかを考える必要があります。

それから2つ目。人間でなくてもよいこと、人間でないほうがよいことをどうするか。この場合、人間を完全に排除することがよいことなのか。私は災害救助ロボットの世界的ネットワークづくりをやっていますが、災害救助の場合は人間がやらないほうがよい、やるべきではない仕事だと考えています。これはあまり反対する人はないと思います。これに対して介護の場合は、はっきり言ってノー。しかし、機械化をしなければならない要素がたくさんある。だから、そのシステムから人間を排除してはいけないし、人間を含む価値提供システムを構築するということです。

3つ目、顧客多様化への対応ですが、効率化や自動化など生産ラインと同じようなことをやる必要がありますが、重要なのはカスタマーインタラクション、カスタマーインターフェースという部分を革新的にしていくことです。いまのサービス業での個客対応、お客さんのいろんなニーズにどんな対応をしているのか。メーカーで言えば、営業だったり、メンテナンス・アフターサービスの部隊が対処していくわけですが、多様化したニーズに対応していくためには従業員を教育し、いかにお客の不満を解消するかを個別に従業員が対応しているのが現状です。これでは非常に効率が悪い。お客に個別に対応するにはものすごい数の従業員が必要になります。だから最近のメーカーのアフターサービス部隊は、自社

内で支えきれず、ある部分を外部のコールセンターで対応するようになっていきます。

しかし、コールセンター側は人を雇えばコストがかかる。だからその効率化を進めていますが単に効率化して事態がかえって悪化してしまうケースも多々あります。例えば最悪の事例の1つが自動音声電話です。製品に問題があって電話した先で自動音声電話が対応したら私は毎回腹を立てます。こちらはクレームがあって電話しているのに、自動音声で1から9までのうち選んでください。そこで電話を切るのは二重とこの会社のものを買ってやるか、となるわけです。せっかく効率化したのにお客をより怒らせて、自分の会社から離れてしまうことをやってしまう。そこをどうやって効率化し、お客とのインタラクションやインターフェースをよくして、お客をあの会社はよかったと思わせるかというところがポイントです。そこにロボットテクノロジーが大きな役割を果たせると思います。

私が強調したいことは3点

今日の講演で私が強調したいことは次の3つです。1つは、次世代のロボットビジネスには、領域を超えた融合と共創の実現が必要である。これはある意味では当たり前なのですが、実際に多くの企業で行われていることは、「自分はこれができるから、この製品を何とかロボットとして売り出せないのか」といった考え方をしていることが多い。そんなに単純ではないということです。領域を超えた共創をしないと、先ほど言った課題は絶対に解決しません。課題は解決しないけど、うちの会社ができるのはこの部分だけということです。お客さんは「よし」と言わないのです。そのためにはお客さんを満足させるための連携を組んで、問題を解決する必要があります。幸いなことに、領域を超えてきわめて広く融合していく必要があるため、逆に言えばほとんどの企業に参入するチャンスはあります。しかし、カスタマーバリューの仮説を立案し、必要な資源をつなぎ合わせて新事業を立ち上げる人材、コア企業がカギを握ります。それは領域を超えた融合や共創をやる上での本質部分なので、そのための中核、そのコンセプトのために必要な資源や機能を融合していき、その融合の中から新しい上位のコンセプトが生まれてくる状態をつくるコアとなる人材とか企

業、これがないと融合・共創はおこりません。

2番目は、次世代ロボットの特徴を生かす。これも当たり前の話ですが、重要なポイントは“ロボット”の言葉から来る思い込みや落とし穴にはまっではない。ひとことで言うなら次世代ロボットの定義をもう一度思い直してみることです。ロボットといった瞬間に、なにか手足があるということをイメージしてしまっ、製品ビジネスの方向に行ってしまうという傾向があります。それも重要な要素ですが、それだけではないことを忘れないでほしいと思います。

3番目は、次世代ロボットあるいはそのテクノロジーを利用して、顧客へのベネフィット提供プロセスの一部を置き換えるということではなく、プロセスをリエンジニアリングするシステムを構築するという考え方をすることです。その際に提案されるシステムには人間を適切どころに組み込んだシステムを考えることが重要です。

次世代ロボットビジネスのポイント

顧客価値の観点から再構成されるトータルシステムの提供。



事業構想やビジネスコンセプトの構築・提示と領域を超えた融合・共創による価値創出とその中における自らの強みを生かしたポジショニング

1. バリュアブルカスタマーとカスタマーバリュー
2. 次世代ロボットの特徴を活かした、人間との融合システム／サービスと製品(ハードウェア)の融合システムの提供が基本
3. カスタマーバリュー提供プロセスのリエンジニアリングアプローチ

チャンスが来ている

サービス化の流れが加速していてチャンスが来ているということです。製造業がサービス化を果たしていることは、どこの経営の本にも書いてあると思います。そういう時代になって来ている。例えば、かつてはコンピュータメーカーであったIBMの、現在の売上げのおそらく過半数はハードウェアの販売事業からではなく、サービスから生み出されている。最近、テレビで流れているIBMの宣伝では、コンピュータの宣伝はしてないと思います。コンサルティングビジネスの話をしていると思います。つまりサービスの宣伝をしているわけです。メーカーだったはずなのに。

一方のサービス業は、今までは人を中心とてビジネスを構築してきたのですが、国際的に厳しい競争にさらされるようになったこともあって、サービス業の工業化戦略というのが動き出しています。同時にサービス業やサービス部門は従来のマスマーケットに対応するのではなくて、個別の要望にどのように応えていくかということに直面しています。雇用構造を見ると、1955年頃にはサービス業はまだ4割弱でしたが、2003年には約4分の3がサービス業に従事しています。サービスセクターの構造改革は極めて重要と言えます。

次世代ロボットビジネスへの思い込み

次世代ロボットビジネスと言ったときに、それはものづくりであるという思い込みがあります。確かにものづくりの要素はあります。しかし、それだけではない。それでない部分のほうが多いのかもしれませんが、新事業を検討されている方やベンチャー起業を考えられている方と話をすると、「技術者でない私には無理ですよ」と最初から諦めてしまっていることがよくあります。そんなことはない。むしろ、いわゆる技術以外の視点をもった人たちが数多くこの領域に入ってくる必要があります。

では特徴を生かせといったときに、ビジネスに役に立ちそうな次世代ロボットの特徴を整理してみると、1つは広範で高度なテクノロジーの融合体であるということが出来ます。技術で言えばセンサ技術などは非常に重要だといえます。それから今ですとユビキタスネットワークとの接続性。これをかませないとかなり厳しくなります。それから身体性や表情。身体性については非常に重要だと思います。2足歩行となると厳しいかもしれませんが、それでも手とか足とかは、顧客とサービス業者あるいは周辺環境との間にくるインターフェースの役割を果たすというところにビジネスチャンスがあると考えられます。そのときにはコミュニケーションが大切な要素になります。その場合、持っている手は物を持つ手というよりは、例えば表現をする手ととらえると非常に大きなビジネスになり得る。さらに感覚や知能を有しているということ。これは特に状況の判断をする。また、ビジネス的にはキャラクター性というものは使い道があります。それにエージェント。こんなような要素をキーワードとしてコンセプトの

中に織り込ませていくことがロボットの特徴を活かすということであろうと考えています。

ビジネスをやっている人に言わせると、分かっているよといわれるような話ですが、繰り返し、あえて言わせていただくと、ロボットの特徴を活かすという以外の留意点としては、ビジネスはビジネスなので、本質は変わらない。その本質とは何かというと、カスタマーバリューは何かという仮説が重要です。まずどういうお客に何をどういう手段で提供するかを設計したうえで、ビジネス化を図ることです。それからサービス化。そこにサービスの要素を導入していかないとうまくいかないと思います。

ロボットビジネス検討の問題点

現在進行中のロボットビジネスの問題点ですが、先ほどからお話ししましたように、いわゆるロボット(機械)にまとめ上げたいと思ってしまう点。次世代ロボットビジネスの中にサービス業の人たちが参入してくるのは歓迎です。サービス業の人たちは、カスタマーバリューから入ろうとする。こうやってお金をくれるからサービスをやろうという順序です。研究・技術・製造の分野の人は、せっかくその技術的な知識を持っていることが逆に障害になる可能性がある。少なくともここ10年間くらいのロボットビジネスのアプローチは、人間を含むシステムとして仕上げることにしたいと思います。これも先ほどお話ししましたが、プロセスの局部を置き換えようとするという問題点があります。リエンジニアリングをしようとする思想がポイントとなります。

もう1つは肉体労働や単純労働のみをターゲットとしてしまいがちになるという問題点。多くのサービス業にとってバックヤードと呼ばれる肉体労働部分というのは、人間しかできないと思って人間がやってきたのですが、コストダウンをはかってきたため、時給数百円程度のアルバイトにそういう仕事をやらせている。サービス業と言ったときに、主に肉体労働を中心とするバックヤード(バックステージ)を対象とするのか、顧客との関係性を構築する役割を担うフロントオフィス(フロントステージ)を狙うのかをはっきり分けて考えることが重要です。

ロボットビジネスのターゲット

少し技術的な話をしてみます。次世代ロボットビ

ジネスというときに、キーとなる技術とは従来の産業機械、産業ロボットの領域からはさらに難しい技術になってくることになります。私が注目しているのはインターフェースに関連する部分です。リモート、センシング、アクティブ、スマート、そしてインターフェース、これらの要素をいかにうまく組み合わせしていくか。それと先ほど話した3つの要素、カスタマーバリューと人間を含んだテクノロジーとの融合システムであるという考え方、そしてカスタマーベネフィット提供システムのリエンジニアリングをする、これらの考え方を念頭において、現在どのようにこれを組み合わせるとビジネスが成立するかという考え方の下で、ビジネスコンセプトをつくっていく必要があると思います。

めざすべき次世代ロボットの一つの姿

- **ロボットの特徴を活かしたインターフェースデバイス**
 - リモート・センシング・アクティブ・スマート・インターフェースデバイス
- **次世代ロボットはメディアであり、インターフェースデバイスである。**
 - 情報伝達メディアである。
 - 編集性を持つメディアである。
 - コンテキストウェアな編集性を持つ。
 - 身体性によるエモーショナル(情動)インターフェース

↓
インターディペンデンスエージェント
Interdependence Agent

新事業の立ち上げ手順

新事業立ち上げのアプローチのポイントを申し上げます。新規の産業を興していくときには、なにが難しいかということ、市場と技術という2つの不確実性をどうやって吸収してコントロールするかというところですが、新しい市場を狙う場合には、市場の立ち上がりの不確実性というのがあります。それから技術です。どの技術が本当のデファクト的な技術になるのか読み込めない。この2つを掛け合わせることになるので、新事業は立ち上げの不確実性が非常に高くなるわけです。通常のアプローチは、現在ある市場から新規の市場へ現在ある技術を使って進入し、その後さらに新規の技術を入れていくか、新規の技術を現在あるマーケットに入れて、狙うべき最終的な新規マーケットに突入していくかということ、この2つが通常とすべきアプローチです。それで考えると、皆さんがさまざまにやられているビジ

ネス領域があって、それぞれの商品や事業ごとに当然市場が変わると思いますが、その狙っている市場から次はどこを狙っていくのか、そこにどんな技術を入れて最終的にどこを狙っていくのかと設計をする必要があります。

ロボットラボラトリー

会場の皆さんは、ロボットラボラトリーという存在をご存知でしょうか。大阪駅前第3ビルの16階にロボットラボラトリーがあります。そこに来ていただくと分かりますが、次世代ロボットビジネスの戦略的施策の立案や展開の支援をする拠点です。私はそのリーダーをやっております。

実証実験の支援など大きく分けると5つぐらいの施策を進めています。RooBOというのは、次世代ロボットをやりたいと思っている企業のネットワークで、現在250社近くが参加しています。面白いビジネスに関しては、大阪市が補助金を出すなど支援をして成功事例づくりをやっています。お気軽に來

ていただき、自分はこうしたことをやろうとしているなどを相談していただければ、なんらかのご支援ができるのではないかと思います。

まとめ

事業構想やビジネスコンセプトの構築とその提示と領域を超えた融合による価値創出、その中におけるポジショニング。製造業ならものをつくるという強みがあるわけで、融合・共創の連携をつくる。顧客価値の観点から再構成されるトータルシステムを提供することが、次世代ロボットビジネスのポイントです。そのために3つの視点は、最も大事なカスタマーは誰で、カスタマーバリューは何かが最初に考えられなければならない。カスタマーバリューを提供する1つのプロセスをリエンジニアリングして、次世代ロボットの特徴をうまく入れ込んで、人間との融合システム、サービスと製品の融合システムを提供することが基本です。



「超速ハイパーヒューマン技術とその応用」

大阪大学大学院工学研究科 機械工学専攻

教授 金子 真

私はこれまで24年間、研究を続けてきましたが、元々はロボットの足とロボットの手の研究からスタートしています。両者は非常に共通点が多く、例えばロボットの手が持っている対象物を大きくしていくと、やがて地球のように大きくなります。ロボットの手はもちろん地球を操ることはできません。地球を操ろうとすると結局、ロボット自身が動いてしまいます。これが歩行ロボットです。このように歩行ロボットとロボットハンドは機能が似ているんです。さてロボットハンドは基本的には2つの機能を持っています。1つは器用な操りで、もう1つはセンシングの機能です。人間は、何か対象物を持ちあげる前に、対象物がどんな硬さなのか、どんな形状をしているのかを確認しようとします。これがセンシング動作です。

ということで、センシング（感知）とマニピュレーション（操り）ということを柱に話を進めていきたいと思います。私はこれまでの研究で、主にロボットハンドを開発してきましたが、その一方で、センシングに着目した研究もいくつかあります。研究成果を実用化したセンサ技術もあります。しかし、今回は時間的な制約もあって実用化技術には触れないようにします。最近、アクティブセンシングを医療診断の分野に展開しています。今日は後半でセンシングの医療応用について説明させていただきたいと思います。なお“ハイパーヒューマン”というのが一体何かについては、講演が終わった時点でイメージをしていただければありがたいと思います。

マニピュレーション

最初にマニピュレーションの分野から具体的に映像で紹介します。これは1996年に実施した実験です。ロボットが限られたセンサを巧みに使って対象物の形状を認識し、三角柱の場合には回転させて隙間をつくって持ち上げている様子がよくわかります。人間は触覚センサをたくさん持っていますが、このロボットは指先には触覚センサがなく、関節に



トルクを感じる触覚センサと関節の角度を検出するセンサのみが備わっているだけです。円柱の周りにゴムを貼って摩擦を大きくすると、ロボットは自動的に戦略を切り替えてころがり動作を使って持ち上げます。

人間は複数の対象物を手で持って互いの相対位置を変えることができます。1999年にロボットにこれと同じようなことをさせてみました。関節の固さを巧みに調節して、人間と同じような動作を実現することに成功しました。2003年には、高速4本指ハンドを開発しました。このハンドの指は人間と同じような形状をしていますが、根元が人間と少し違った機構になっていて、それぞれの指が同じ回転中心軸回りに回転できるようになっています。例えばビンのキャップを開ける場合、人間なら両手を使って行ないませんが、このロボットは1本の手でキャップを開けることができます。

ここまでがこれまでに開発してきたロボットの手による操り動作例です。では人間の手はどの程度器用な操りができるのでしょうか？このビデオはプロのマジシャンが棒状の物体を指先で巧みに操っている様子です。きわめて鮮やかな手業です。これはジャグリングといって棒やビール瓶を5本、6本と次々と受け取っては投げあげることを繰り返しています。もちろんここまでするには練習を積み重ねる必要がありますが、このような動作がはたしていまのロボットにできるのかということです。これらの

動作はいずれも器用性が要求されています。器用性という切り口で考えたとき、いまから10年、20年、30年経ってもロボットが人間に勝てるとはとても思えません。

逆に見方を変えて、ロボットが人間に勝てるものはないのかと考えると、じつはたくさんあります。適当に思いつくだけでも、スピード、正確さ、忍耐力などをあげることができます。非常に面白いパラドックスは、スピードと正確性では圧倒的にロボットが人間に勝っているのに、器用性という切り口で考えた途端に、ロボットは人間に負けてしまう。それはなぜなのか。考えられる理由としては、人間の指先にきめ細かいセンサや、やわらかさを微妙にコントロールすることができる機能が備わっていますがロボットには付いてないというのが大きいと思います。

動体視力の限界

人間がどれだけスピードに対して弱いのかを、簡単なデモによって皆さんに認識していただこうと思います。1秒間に画面上に文字が出てきます。文章が読めるかどうかで自分の動体視力を確認することができます(この後、1秒間に連続的に文字が出る。5文字、10文字、15文字、30文字)。人間は1秒間に15文字程度が限界のようです。ここで私が言いたいことは、これが人間の動体視力の限界であり、この範囲の中でしか世の中を見ていないということです。これが最近の私の研究の出発点になっています。

人間の動体視力は1秒間に15文字が限界。しかし、機械の場合はどうなのでしょう。1秒間に最低でも1,000枚は処理できます。最近のデータでは1秒間に約10,000枚も処理できるようになったという報告があります。実に人間の約600倍のスピードで機械は処理できます。もう1つ、私たちが行ったおもしろい実験があります。ボールを1mの高さから落とします。目から入った情報が脳に行き、脳で処理されて最終的には筋肉に指令がいき、筋肉が動くわけですが、筋肉の動作時間までを考えてボールが捕れるかという実験です。この場合、被験者はボールを目で追いかけるのではなく、ごく自然に前を見てもらってボールが見えた時点でアクションを起こすように指示しておきます。この実験を高速カメラで撮った映像があるのでご覧ください。

手元にきたときのボールのスピードは秒速4mくらいです。ボールは単に握れば捕れるところを通過するのに、人間は捕ることができません。眼に刺激が入り、これが脳に伝わり、筋肉が反応するまでに0.2秒~0.3秒かかってしまうため、秒速4mのボールは0.2秒の間に80cmも進んでしまいます。つまり人間がボールを目で捉えた時点からボールは80cmも動いてしまうのです。だから、この実験は人間の能力を超えた実験ということになります。

では、ロボットの場合はどうでしょうか。まったく同じ条件で、高速ビジョンでボールを見てロボットがキャッチングする実験です。この実験ではロボットは落ちてきたボールを掴むことができます。このロボットは器用さをもっていませんが、人間にはできない高速捕獲動作ができるというのがポイントなのです。では、実際に掴んだ瞬間に何が起きているのか。人間にはその瞬間が見えません。なぜ見えないかということ、人間の動体視力が遅いためです。

このような高速ロボットを開発したときに、不具合があっても肉眼でみただけでは調整ができません。なぜかという、動きが早過ぎて人間の眼に見えないからです。実際にロボットがこの捕獲動作を行なって、失敗したとしてもどこが悪いのかが分かりません。唯一の調整方法は、高速カメラを使って映像を撮って、それを見ながら分析しないとどこが悪いのかわかりません。

こうした予備実験をもとに、私たちは常に速い人工の眼、非常に速いアクチュエータを使って、新しい世界を切り開いていこうというプロジェクトを始めました。このプロジェクトでは2つの方向性を考えています。1つは個々の要素技術のブラッシュアップ。例えばビジョンが速くなっていくと、世の中は変わっていきます。いまは高速ビジョンの重要性をよく理解されていません。その理由は高速ビジョンが普及してなくて我々の手元ですぐ使えないからです。実際に高速ビジョンを使ってみると、世の中のメカトロ技術を変えてしまうという実感がわいてきます。

眼とアクチュエータの融合

私たちがもっとも興味を持っているのは、速いビジョンと速いアクチュエータを使わないとセンシングできない事象です。例えば生体を加振してそのと

きの動きを速い眼で観察することによって今までにない新しい診断技術が開けるのではないのかという点です。

はじめに高速ビジョンでどんなことができるのかみてみましょう。これは1秒間に1,000点処理ができる眼です。レーザー光を対象物に当てることによって、あっという間にコンピュータ上に対象物の形が形成されます。こうしたシステムは今までもありましたが、何が違うかというと、従来方式よりも30倍速い。高速ビジョンはデータマイニングに使うこともできます。製薬会社がアトピー用の薬を作ったとします。それを直接人間にテストするわけにはいきませんので、はじめは動物を使ってテストすることになります。薬の効果は1時間あたりのマウスの引っかかり回数が薬の投与前後でどれだけ減ったかで評価されます。マウスの引っかかり周波数は非常に速く人間の動体視力を超えてしまうので、人間には引っかく回数を数えることができません。ところが高速ビジョンを使うと、リアルタイムで結果を出すことができます。これ以外にも、ビジョンを高速化することにより得られる効果はいくらでもあります。

一方、速いアクチュエータについては、1つだけ事例を示します。これは5～6年前にハーモニック・ドライブシステムズという会社がつくった非常に強力なモーターです。今までのモーターに足を付けてジャンピングロボットを設計することは考えられませんでした。このモーターは非常に強力で、地面をキックして50cm以上も跳び上がることができます。

ロボット応用について話を移します。速い眼(ビジョン)と速いアクチュエータを組み合わせれば、人間にはできない動作ができるようになります。この実験ではエアホッケーのテーブルの上に棒状物体を置いて滑らせている様子です。物体に回転を加えると、人間は動体視力が弱いと捉えられなくなります。これに対して、速い眼と速いアクチュエータを使ってロボットを作り、高速ビジョンを組み合わせました。高速ビジョンで対象物の動きをとらえてロボットに指令値を送り、最終的にロボットが対象物を捕らえるというシステムです。このロボットを使って先ほど人間が失敗した実験を行うとどうなるのか見てみましょう。これは高速ビジョンで対象物の動き

をきっちりとらえて、対象物の回転をぴたっと止めようという実験です。対象物のどこに当てれば回転が止まるかということのをすばやく計算して、そこに指をさっと持って行き回転を止めています。人間にはとてもできないことです。回転が停止できるのなら今度は、並進も同じように停止させることができます。この実験では回転だけ残して、並進をピタッと止めています。

ここで強調したいのは、ロボットと競争するときには、ロボットの持ち味であるスピードを生かすという考え方が重要だと思います。それを追求していけば、人間にできないことがロボットにできる、つまりロボットが人間に勝てるわけです。

センシング技術

こうした要素技術を社会にどのように役立てることができるということで、次にセンシングのことをお話ししたいと思います。環境の硬さを測りたいときに、人間は触って力を加え、変形の様子を眼で見たり手で実感したりします。ここで押す動作を生成するのに高速アクチュエータ、変位を見るのに速い眼を使うと、高速に硬さを測ることができるようになります。硬さというのは医療診断においてきわめて重要です。例えばお医者さんが触診するのは、体にシコリがないかどうかを診ています。シコリはまさに硬さが変化している部分です。そういう意味で、硬さ計測に対して速いアクチュエータと速い眼を応用し、医療診断に利用できるのではないかと考えてみました。

硬さを測るのに大きく分けて2つの方法があります。1つは実際に触って測る方法で、もう1つは触らないで測る方法です。例えば対象物に水や空気をあてて、その変形を眼やレーザーセンサで見れば非接触で硬さが測れます。非接触方式の利点は、摩擦係数はゼロで、環境を傷つけないで硬さ計測ができる点です。非接触方式は衛生面や環境に危害を加えないという点で接触方式よりも優れています。ただ、精度よく硬さを測るには接触方式にならざるを得ないと思いますが、私たちは医療応用を考え、衛生面、危害を加えないという面を重視し、非接触計測法を採用しました。

次に非接触で硬さを測る技術の生体応用について紹介したいと思います。生体の中でいちばん速い動

きが必要なのは眼です。眼圧測定では、先端から空気が出る。時間にして30分の1秒。その間に眼が変形します。そのときの眼の変形を光センサで捉えています。その変形がピークになったときの外圧が眼圧と呼ばれています。ただ残念ながらこの光センサでは眼のグローバルな変形情報を捉えているだけで、眼の実際の変形の様子は分かりません。眼の変形を詳しく見るために高速カメラを導入しました。

これは先ほどの装置でどういう空気噴流分布が出ているのかを計測したものです。この立ち上がりから終わるまでが20分の1秒程度です。この空気噴流が眼に当たって力が加わり角膜が変形します。次に1秒間に500枚撮れるカメラの映像を紹介します。硬いと思われがちな眼が大きく凹む様子がよく分かります。眼科の先生たちですらこの映像を見るまでは、眼がこんなに変形することを誰も知りませんでした。

見えないものを見る

眼でも何でもそうですが、実際に何が起きているかの早い現象を、速いカメラでとらえることは非常に重要なことだといえます。それによって今まで見えていなかったものが見えてくる。私はこの点を特に主張したいと思います。

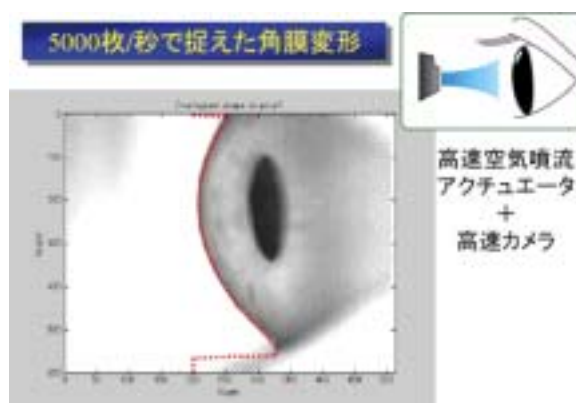
この緑色は力、青色はカメラでとらえた変形です。よくよく見ると眼の変形が力に対して遅れているように見えます。最初は私たちの測定方法が悪いに違いないと思っていました。力の時間の原点と変位の時間の原点が合っていない可能性まで含めているような視点でチェックを行なった結果、この時間遅れというのが眼圧とどうも関係しているようだということが分かってきました。特に眼圧の高い人は、なかなか変形しなくて遅れが大きい。時間遅れというのはいわゆる線形モデルでは説明できない非線形現象です。

どうしてこのような現象が起こるのかいろいろなモデルを考えた結果、チェーンモデルで明快に説明できるということがわかってきました。チェーンは、張力をかけているとまったく変形しない。張力がなくなるとチェーンは簡単に曲がってしまう。これを角膜にあてはめると、内圧がかかっているときは張った状態。外から空気がだんだん増加してくる状況を考えます。空気が弱いときは内圧が外圧より強い

ため、張力は弱くなりますが張った状態には変わらないため角膜の変形は起こらない。やがて真ん中あたりの外圧が内圧に勝ってくると、中心付近の角膜が変形し始める。このチェーンモデルによって先ほどの遅れ現象は明快に説明することができるようになりました。

この考察を裏付ける実験結果も得られました。こちらが眼圧の高い人、こちらが低い人。これを比較すると非常にきれいな相関が見られます。ということかという、眼圧が高ければ高いほど、遅れ時間も大きくなります。別の言い方をすると、この結果が得られたことでチェーンモデルの妥当性を示すことができたと考えています。この結果から今度は非常に面白いアプリケーションが考えられます。今までの眼圧計では比較的強い力が眼に加わり、眼がかなり変形していました。

今回得られた結果から、大切なことは、眼をどれだけ変形させたかではなくて、眼がいつ変形しはじめたかを知ることです。弱い空気を出して眼が変形した瞬間に空気を止めてしまえば、患者さんにとって空気が来たかどうか分からない状況の中で眼圧が測れてしまうことになります。結果的に患者にとってやさしい眼圧測定が可能になるというふうに考えています。



胸腔鏡下手術での応用

次は肺への応用について紹介します。胸腔鏡下手術というのがありますが、これは胸の横に穴を開け、そこから内視鏡カメラやカンシを入れて肺の中にある腫瘍を切除する手術です。術前にCT画像を見れば腫瘍が肺のどこにあるかが分かります。しかし、実際の手術は肺から空気を抜いた状態で行うために腫瘍の位置が変化してしまい、医師は切除したい部

位を手術中に推定しながら作業を行わなければなりません。従来から、術中に腫瘍部位を特定できるセンサの開発が望まれていました。

私たちが作ったセンサは、先ほどの眼圧計測システムと同じで、真ん中から空気噴流を出す構造になっています。さらに肺の変形を捉えるために光ファイバーセンサを使いました。ただし、実際には距離情報は一切使っていません。色の違いや、傾きの違いの影響を排除するため、実際には距離情報ではなく入力と出力の位相情報を用いました。ただ、いちばんの鉄則はお医者さんに生の映像をできる限り忠実に見せることだと思います。そのときに何が問題かというと、高速カメラの映像はリアルタイムでは出せないことです。なんとか高速カメラで見えるような映像をリアルタイムで出せないのかといういろいろ考えて、たどり着いたのがストロボを使って測ることでした。アクティブストロボイメージャと名付けました。空気を振動させ、ストロボで空気の周波数と少し変えた状態でフラッシングさせてカメラで撮影すると、お医者さんの動体視力の中にこの映像をもてくることができるというアイデアです。



おわりに

今日の講演の中で、皆さんに動体視力を実際に確かめてもらいました。皆さん方の動体視力は高々1秒間に15文字程度で、その動体視力で見えている世

界は非常に狭い範囲に限定されます。実はその外に人間の眼では見えない現象が、身近にたくさんあります。人間の動体視力内で見える世界に閉じこもるのでなく、その外側の世界にまだ見えていない世界があることを知っていただいて、そこに積極的に出てきていただきたいと思います。特に学生に対しては、人間が見えない世界におもしろい研究テーマがたくさんあることを知っていただきたいと思っています。「ハイパーヒューマン」と名付けたのは、ロボットは人間に勝てない部分もあります。でもロボットが人間に勝るところもあるし、そこをもっと伸ばしていき両者が補間しあう形で、人間とロボットが共存していくという考え方が重要だと思います。

質疑応答

<問> ロボットの定義とは一体どんなものなのでしょうか。

→ (答) ロボットの定義はヒトそれぞれ違っていると思います。私は1981年からロボットを始めて、2000年初めまで、ずっとロボットばかりに関わってきました。4～5年前から人工筋肉などの要素技術はロボットの分野で多く開発されています。私が後半に説明した医療診断はロボットではなく、医療診断の分野になります。ロボットから得られた要素技術は他の分野でも十分に活用できると思います。ロボット自体の市場は医療分野に比べると非常に小さいですが、ロボットの要素技術が他の分野に広がる可能性は大きく、そういう意味ではビジネスチャンスは大きいに期待できると思います。ロボットビジネスというときのロボットは広い意味で解釈しています。

<問> 私の知人には宗教関係の人が多くいて、眼に見えないものが見えると言います。病気を治す先生に言わせると、人間の体が悪いときには色が違うそうです。何か周波数のようなものを感知するものがあるのでしょうか。

→ (答) 大変おもしろい質問ですが、超能力的な世界はよくわかりません。