応
般

② 人機能の補完 ―高齢者・身障者の運動機能支援―

■ 長谷川泰久 ■ 名古屋大学

人の機能補完の概要

事故や疾病による運動障がいや加齢などによる運動機能の低下は，トレーニングやリハビリなどによって回復することが望ましい．しかし，元の機能への回復が難しい場合には，支援機器による機能補完が必要となる場合がある．この補完によって社会へ復帰し，本人の能力を活かした仕事などの活動ができるようになることは，本人だけでなく社会にとって大変望ましいことである．

この運動機能の低下や運動障がいは，身体の部位・程度が個人で異なり，加齢など経時的な変化，個人特有な症状が見られることもある．また，身体だけでなく，発達障がいなど知的な面の支援も機能補完であり，扱う対象は多岐にわたる．よって，補完アプローチや支援機器は，物理的なものから情報的な支援までさまざまである．

身体機能の補完は，これまで介助者によって個々のニーズに応じて行われてきた．しかし，介助者の身体負荷の問題が顕著となる老老介護や，介護コスト増加等の社会問題の解決を目的として，ロボットへの期待が高まってきている．ロボットは，プライバシーの保護や個人の自立心・尊厳を維持する上で介護者よりも望ましい場面もあり，障がい者が遠慮することなく，より細かな希望に沿った支援ができるものとして，その活用が望まれている．

そこで，まず高齢者や身障者を対象とした歩行機能の補完について，次に筋力が低下した方の上肢運動機能の補完について，3 番目に発達障がい児の社会性機能の補完について支援事例を交えて説明する．最後に，この分野に関する教育研究への取り組みについて紹介する．

歩行機能の補完

脳卒中患者や高齢者にとって歩行機能の維持・回復を目的としたリハビリテーションは，本人だけでなく，社会にとっても非常に重要なものである．歩行は人間にとって最も基本的な活動の 1 つであり，日常生活では不可欠である．歩行によって高齢者は肉体的・精神的な健康を保つことができ，生活の質（QoL）を高めることができる．また，ひとたび歩行が困難になると，日常生活の運動量が減り，本来の疾患は重症でないにもかかわらず連鎖反応的にそのほかの身体的機能も衰える「廃用性症候群」となり，最終的に寝たきりの状態に結びつく危険性も指摘されている．医療・介護・福祉のすべての場面において，人の歩行を支援するロボットの需要は今後ますます増加するものと考えられる．たとえば，医療・リハビリテーションにおいて，脳卒中後の歩行再獲得を目指した身体装着型の歩行支援ロボット“HAL 医療用下肢タイプ”は，治療試験が開始されている．また，ゲーム感覚でバランス機能の向上や，歩行訓練ができる機器も研究・開発されている．

歩行訓練時の最も高いリスクの 1 つとして転倒があり，この転倒を防止するには，回復と予防の 2 つのアプローチがある．歩行者が，何らかの原因で，すでに体勢を崩し始めている状態からの回復は，高齢者にとって足腰に（さらに杖を持っている場合には腕にも）大きな負担となる．また，ロボットが，すでに転倒し始めている人を回復させるためには，ロボットが瞬時に大きな支持力を発生する必要があるため，低出力のロボットでは身体を支えきれない．よって，転倒動作が検出されてから，その対処を行うのではなく，あらかじめ転倒の要因を排除しておく転倒予防が，転倒防止策として有効である．

図 -1　杖ロボットを用いて歩行している様子

我々は，杖ロボット "Intelligent Cane" の研究開発に取り組み，高齢者が直感的に使用でき，安全に歩行できるパートナーとなるべくロボットの研究を進めている．転倒要因の 1 つである両脚が一直線に並ぶ状態「タンデムスタンス状態（後述）」を避けることで転倒を予防する技術を研究・開発した．**図 -1** に示す杖ロボットは，支援対象である高齢者にも親しみを持ってもらえるようテントウムシ（転倒無視）を模したカバーで覆い，任意方向に移動ができるよう駆動部に 3 つのオムニホイールからなる 3 輪台車を採用している．また，持ち手部分に 6 軸力覚センサを搭載し，使用者がロボットに加えた並進力とモーメントに応じアドミッタンス制御にて移動する．また，地面から高さ約 20cm の位置にはレーザ距離計（LRF）を搭載し，人の両脚の位置を計測し，使用者との相対距離の制御だけでなく，その位置の変化履歴から現在の歩行フェーズを推定する．転倒の一因と考えられるタンデムスタンス状態は，旋回時に外側の脚が内側に入ることで起きることが多い．そこで，この歩行フェーズに応じて自動的にアドミッタンス制御パラメータを変更することで，杖ロボットの横方向の動きやすさを変更し，使用者の上体の向きを拘束する．これによって下肢の向きも拘束され，タンデムスタンス状態を予防し，転倒を予防する [1]．パルスオキシメータを搭載し，歩行中の心拍数と血中酸素濃度を取得し，歩行負荷の把握および調節に使用する．また，タッチパネルディスプレイを用いたグラフィックユーザインタフェース（GUI）や音声ガイドを通してインタラクティブな操作が可能である．図 -1 は，国立研究開発法人 国立長寿医療研究センターにて高齢者が理学療法士と共にロボットを用いて歩行している様子である．リハビリテーション（以下，リハビリと略す）の場に 3 カ月間，本杖ロボットを導入した臨床試験では，リハビリ現場に与える効果を検証し，体力維持・回復への適度な運動負荷の提供とリハビリへのモチベーションの維持，患者によっては体力向上が報告されている．

高齢者にとって歩行は，その移動機能に加え，筋骨格系から循環器系まで健康維持に良い効果が期待できる．さらに，病室間の移動や家庭から社会へ出ることで人と人との繋がりを保つこともでき，認知機能へも良い影響が期待できる．つまり，歩行は高齢者の生活の質を維持する基本的な運動であり，本杖ロボットにより，歩行時の転倒リスクを低減しながら，歩行やリハビリが行える．また，この杖ロボットを導入することで，高齢者や疾患の軽い患者がロボットと共に安全に手軽にリハビリを行い入院期間を短縮できるとともに，より重度の疾患を持つ患者には，より厚い介助を提供できる環境整備に寄与できるものと期待している．

上肢の作業機能の補完

デュシェンヌ型筋ジストロフィや脊髄性筋委縮症（SMA）などの遺伝性疾患による筋力低下障がいは，体幹や四肢の筋力低下・筋委縮により，姿勢維持や上肢や下肢に力を入れることが難しくなる．症状の進行によって移動や食事といった日常生活に困難が伴い，介助者の支援が必要となるが，常に他者の介助を受けることによる患者の精神的負担や，介

助者の負担が問題となっている．そこで，このような患者の自立した生活を支援し，生活の質の向上を目的とした上肢支援の機器が研究されてきた．上肢支援機器はロボットアーム型と身体装着型の大きく2種類に分類できる．ロボットアーム型として，産業技術総合研究所のRAPUDや，セコム（株）のマイスプーン，早稲田大学 菅野らの車椅子用ロボットアームなどが挙げられる．これらは，手先や首の動きといった体の残存機能を用いて，ジョイスティックで車椅子や机に取り付けられたロボットアームを操作し，使用者の腕の代わりに作業を行うものである．重篤な障がい者にとって大変有効な支援となる．

一方で，身体装着型は患者の障がい部位に機器を装着し，身体の動作を直接支援するものである．この際，患者は自身の手が直接作業に参加できるため，運動機能を維持でき，さらに自身の体を動かすことで主体性を感じられる．さらに，身体装着型は，能動支援型と受動支援型の2種類に細分類できる．能動支援型機器は，アクチュエータを用いて支援力を発生し支援するシステムである．たとえば，筑波大学 山海らのHAL-ULや早稲田大学 田中らの上肢作業補助機がある．このアクチュエータを用いたシステムでは，患者の本来の力以上の力を発揮できるため，作業できる対象動作が多いのが特徴である．受動支援型機器は，ばねなどの受動要素を用い，主に重力を免荷することで，使用者の身体運動を支援するものである．たとえば，Microgravity Products社のArmonや北里大学 浅井らのPortable Spring Balancer，慶應義塾大学 森田らのトルク補償型肩装具が提案されている．受動支援型機器は，装着者の重力を補償するため，残存機能が少ない場合には使用できないが，アクチュエータを必要とせず，身体の本来が持つ巧みさ，特に手では巧緻性を活かした作業を行うことができ，また機器のコストも抑えられる．よって受動支援型機器は，重力の影響を除いた状態で，身体を動かすことができる筋力が残存している場合の支援に適している．

手が物体を操作する際には，物体を把持する機能だけでなく，手首にもそれを支える筋力が必要となる．筋力低下者にとって手首に支援がなければ，把持物体を持ち上げ，移動することができない．そこで，従来はアクチュエータを用いず手首の安定保持を目的とした手背屈装具（カックアップスプリント）が用いられている．これは，手首を固定できる反面，掌屈・伸展ができず，手先や掌を目的の位置へ移動させる作業が制限される．そこで，我々は，**図-2**に示すような前腕，上腕だけでなく手首を受動支援型と能動支援型のハイブリッドにて支援することで，作業時に手先を目的位置まで移動するような緻密な作業を支援できる支援機器[2]を研究開発した．この支援機器は右手を手首支援フレームに置き，左手で球型のジョイスティックを操作することで手首の角度を調節できる．また，手首支援フレームに内蔵する板ばねにより，自らの力で手首角度を変え，手先位置を微調節できる．さらに，手首支援フレームにノートや教科書といった薄型の重量物を把持するフックがついており，把持時の手首の負担を大幅に軽減できる．脊髄性筋萎縮症患者にも本支援システムを使用してもらい，上肢の巧緻性評価であるAction Research Arm Testの，すべてのテスト項目において，従来の支援機器よりも，作業効率，作業達成度の向上を確認した．患者さんへのヒアリングの結果，「物を持ち上げるために支援があるとありがたい」，「手首支援により手首が伸びることがうれしい」など，手首の支援に対して好意的な意見をいただいている．

図-2　Armonに搭載したハイブリッド手首支援機器

社会性機能の補完

社会性の機能不全を有する自閉症スペクトラム障がい児（自閉症児）を中心とした発達障がい児の療育支援への取り組みが筑波大学 鈴木らにより進められている．装着型機器を利用することで，複数人による相互作用行動とそれにより生じる情動に関する身体・生理信号を活用し，表情・情動状態，および対人交流とその意図を顕在化し明示する「ソーシャル・イメージング」技術の研究[3]がある．社会性の機能は言語や運動の発達とかかわりがあることから，装着型機器と画像計測を活用することで，身体運動のみならず複数人のグループダイナミクス，さらに表情や生理状態といった情動の変化を示す社会的行動（相互作用行動）を計測する．その後，装着型機器による光提示フィードバックや先進的な画像計測，複合現実感を利用し，特別支援学校や特定非営利活動法人と有機的に連携することで，発達障がい児の社会性形成の支援と創造的活動の促進を目指している．

教育研究プログラムについて

人の機能を補完する機器の研究・開発には，人・ロボット・情報系の融合複合分野の学問領域を習得する必要がある．そのために，工学・医学・ビジネス・心理・芸術領域などの分野を横断する教育が必要である．たとえば，人の運動を支援する技術の開発では，メカトロニクスの知識に加え，支援される人の筋骨格系や神経系をはじめとする運動制御構造やそれの行動を決定づける知覚・認知・意思・心理も考慮する必要があり，さらには，それらの運用を支える社会システムも考慮が必要となる．このような学際的な分野の教育実施例として，筑波大学のグローバル COE【サイバニクス：人・機械・情報系の融合複合】（代表：山海嘉之教授，筑波大学，2007 ～ 2011 年）が行われた．ここでは，人支援技術分野における未来開拓型人材育成や国際教育研究の枠組みが整備され，本枠組みはのちに，自立した生活の支援を実現するための人類社会が抱える共通課題の解決に向けた「エンパワーメント情報学」プログラム（代表：岩田洋夫教授，筑波大学，2013 ～ 2019 年）へ，学位プログラムとして発展した．このエンパワーメント情報学は，補完・協調・拡張の 3 つの領域から構成され，補完領域は，加齢や疾患や外傷などによって身体機能に障がいがある方の機能の補完を主軸とし，革新的な人支援技術の開発能力と実践的な研究力を同時に培うことを狙いとして推進している．学問分野を横断する講義に加えコースワークや，チュートリアル，インターンシップなど，さまざまなタイプの学び方と実践に取り組んでいる．

参考文献

1）Nakagawa, S. et. al. : Tandem Stance Avoidance Using Adaptive and Asymmetric Admittance Control for Fall Prevention, IEEE Trans. on Neural Systems & Rehabilitation Engineering, 24(5), pp.542-550 (2016).

2）Hasegawa, Y. et. al. : Development of Wrist Support Mechanism for Muscle Weakness Person to Work on Desk Work, International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, pp.9-12 (2014).

3）鈴木健嗣：ソーシャル・イメージングの創成－自閉症・発達障がい児の社会性形成支援に向けて－，情報処理，Vol.56, No.6, pp.561-563 (June 2015).

（2016 年 10 月 18 日受付）

■長谷川泰久　hasegawa@mein.nagoya-u.ac.jp

名古屋大学大学院修了後，三菱重工業（株），名古屋大学助手，岐阜大学講師，筑波大学講師，准教授を経て，2014 年より名古屋大学教授および筑波大学客員教授．上肢の作業支援や歩行・走行支援ロボット，手術支援ロボット等の研究に従事．