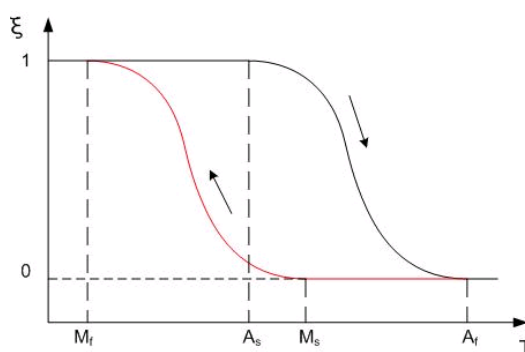


Nietypowe elementy wykonawcze w robotyce – SMA

W artykule tym chciałbym przedstawić nietypowy akuator – element wykonawczy stosowany w robotyce. Akuatorem tym jest stop z pamięcią kształtu (Shape Memory Alloy - SMA). Artykuł jest podzielony na trzy części. W pierwszej zostanie opisany akuator, fizyka jego działania, jego wady i zalety. W części drugiej opisane zostaną znane metody sterowania. Część trzecia jest częścią praktyczną, w której zostaną zaprezentowane przykładowe konstrukcje robotów wykorzystujących jako napęd prezentowany przeze mnie stop.

Stop z pamięcią kształtu jest nowoczesnym materiałem zaliczanym do grupy materiałów typu SMART. Cechą wspólną wszystkich tych materiałów jest możliwość wpływania, przez odpowiednie sterowanie bodźcami, na zmianę niektórych właściwości fizycznych tych materiałów. Materiały te mogą pracować jako akulatory lub jako czujniki a nawet pełnić obydwie te funkcje na raz. Bardzo dobrze opisana jest cała rodzina materiałów SMART na stronie [1].

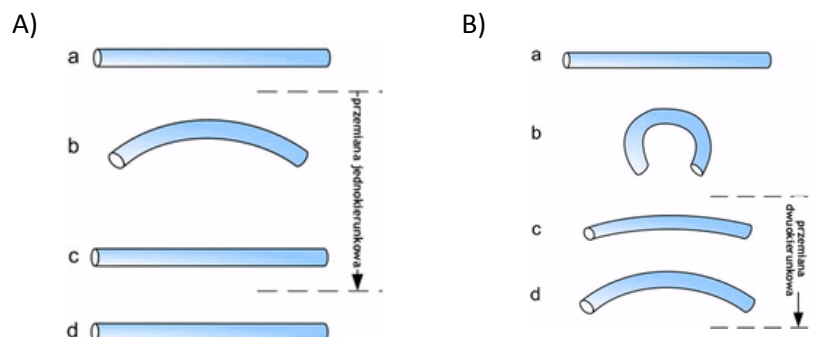
Akuator SMA jak sama nazwa wskazuje potrafi zmieniać kształt. Następuje to w wyniku przemiany fazowej materiału. Mówiąc prościej pod wpływem pewnego bodźca stop zmienia pewne swoje właściwości materiałowe. Jedną z tych właściwości jest kształt. Ale tak naprawdę zmiana kształtu jest efektem wtórnym zmian wewnętrznych jakie zachodzą w strukturze materiału. Sama przemiana fazowa kojarzy się zwykle z przemianą wody w lód lub wody w parę. W tym przypadku zachodzą podobne zjawiska, tyle, że przemiana fazowa nie wiąże się ze zmianą stanu skupienia. Jest to przemiana ciała stałe w ciało stałe. Aktywatorem przemiany jest zmiana temperatury. Pod wpływem przyrostu temperatury stop przechodzi z fazy niskotemperaturowej zwanej martenzytem do fazy wysokotemperaturowej zwanej austenitem. Proces przejścia jest opisany za pomocą charakterystyki termomechanicznej przedstawionej na rysunku 1.



Rys. 1. Charakterystyka elektromechaniczna
Odształcenie w funkcji temperatury [2]

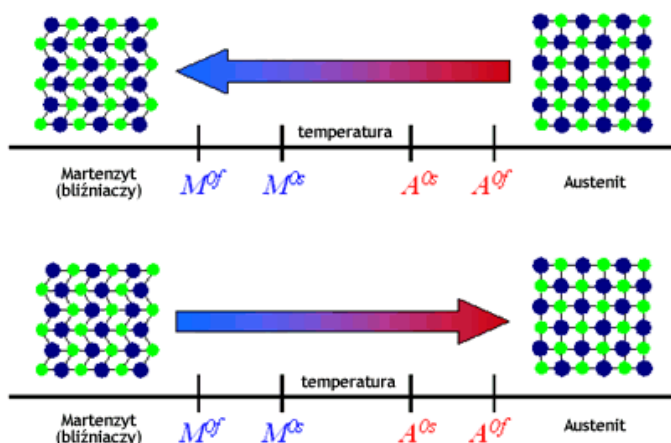
Jak widać charakterystyka ta jest nieliniowa dodatkowo wykazuje pętlę histerezy – przemiana od fazy martenzytu do austenitu odbywa się w innych temperaturach niż przemiana odwrotna. Podczas przemiany zmienia się struktura wewnętrzna materiału. W fazie niskotemperaturowej struktura materiału jest nieuporządkowana, materiał jest plastyczny, można go łatwo deformować. W fazie wysokotemperaturowej struktura jest równomierna, krystaliczna, sześcienna, co powoduje, że materiał nie daje się w tak łatwy sposób deformować plastycznie, materiał jest sztywny i sprężysty (po ustąpieniu siły mechanicznej natychmiast wraca do swojego kształtu). Wpływ przemiany fazowej na zmianę kształtu przedstawiony jest na rysunku 2. Przedstawione są na nim dwa zjawiska. Efekt jednostronnej pamięci kształtu oraz efekt dwustronnej pamięci kształtu. O ile jednostronny efekt pamięci kształtu jest cechą materiałową o tyle dwustronny efekt pamięci kształtu może zostać materiał „nauczony” w procesie wytwarzania. Na czym polegają te efekty. W punkcie a rysunku 2 przedstawiony jest nieodkształcony materiał będący w fazie niskotemperaturowej. Podczas przejścia a-b materiał jest deformowany przez zewnętrzną siłę, po ustaniu tej siły materiał jest dalej

zdeformowany (punkt b). W następnym kroku podgrzewamy materiał tak, aby przeszedł z fazy nisko do wysokotemperaturowej. Przejściu b-c towarzyszy powrót do kształtu a czyli do stanu niezdeformowanego, jest to pierwszy efekt pamięci kształtu. Powrót do fazy niskotemperaturowej może odbywać się w dwojaki sposób. Stop wykazujący jednostronny efekt pamięci kształtu pozostanie niezdeformowany (d = a), natomiast stop wykazujący dwustronny efekt pamięci kształtu podczas studzenia częściowo zmienia swój kształt zbliżając się kształtem do stanu odkształconego.



Rys. 2. Efekt pamięci kształtu jednostronny (A) oraz dwustronny (B) [1]

Rysunek 2 przedstawia makroskopowo efekt pamięci kształtu. Jak wygląda to w mikroskali, jak zmienia się struktura krystalograficzna przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Widok mikroskopowy przemiany fazowej. [1]

Na powyższym rysunku przedstawiona została przemiana fazowa przy braku obciążeń mechanicznych. Temperatury zaznaczone na tym rysunku oznaczają:

A^S – początkowa temperatura przemiany martenzytu w austenit,

A^F – końcowa temperatura przemiany martenzytu w austenit,

M^S – początkowa temperatura przemiany austenitu w martenzyt,

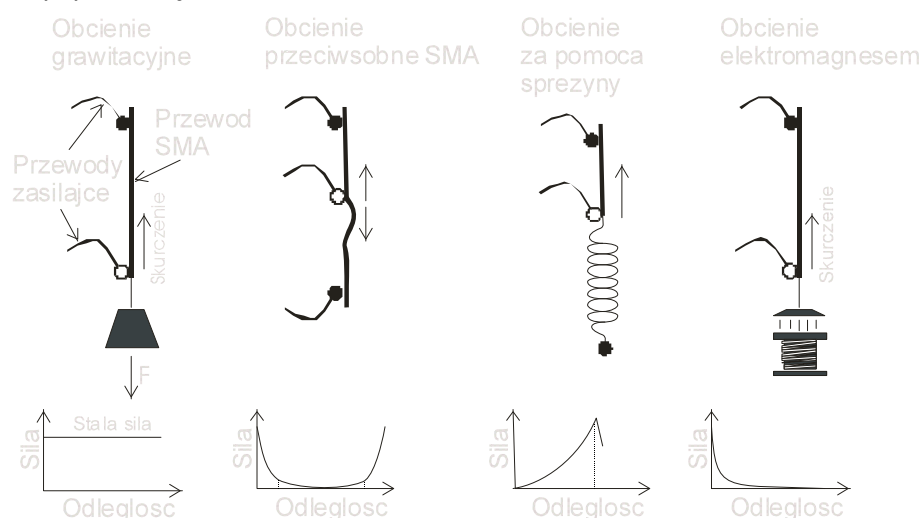
M^F – końcowa temperatura przemiany austenitu w martenzyt.

Dodatkowy indeks 0 oznacza właśnie brak obciążenia mechanicznego.

Dostarczanie ciepła wymaganego do przemiany może odbywać się na kilka sposobów. Poprzez zastosowanie zewnętrznych źródeł ciepła, przykładowo ogniw Peltier'a, poprzez grzanie oporowe, za pomocą silnych laserów (metoda stosowana w nanorobotach). Chyba najpopularniejszą metodą jest grzanie oporowe. Materiał ten jest stopem, a więc składa się z metali, a co za tym idzie jest przewodnikiem elektrycznym. Każdy przewodnik pod wpływem przepływającego przez niego prądu wytwarza ciepło. Ciepło to jest wytwarzane zgodnie z prawem Joule'a – Lenza i jest ono zależne od rezystancji oraz od kwadratu prądu. We współczynniku proporcjonalności ukryte są warunki wymiany ciepła z otoczeniem.

W jaki sposób można obciążyć mechanicznie taki aktuator. Przykładowe możliwości są zaprezentowane na rysunku 4. Na rysunku tym są przedstawione najprostsze możliwości, które mogą

być łączone w bardziej skomplikowane układy obciążeń. Na rysunku tym przedstawione są również charakterystyki siły tych obciążeń.

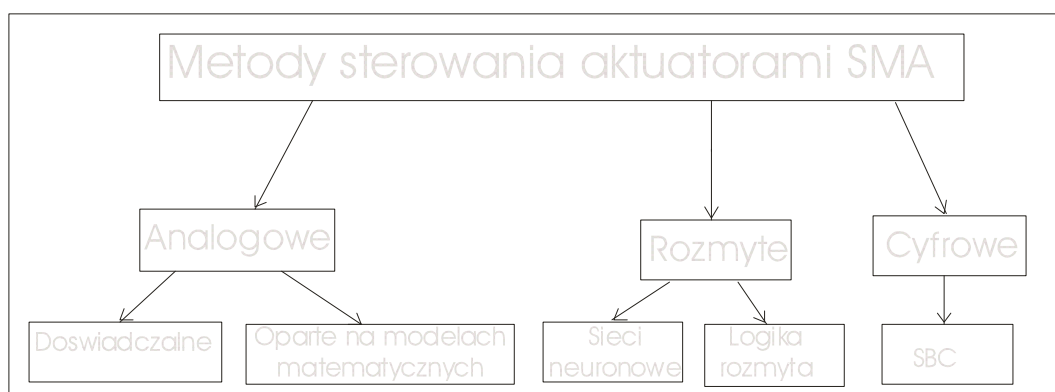


Rys. 4. Metody obciążania mechanicznego aktuatorów SMA

Dostępne są różne wersje aktuatorów SMA. Są to ciągną kurczące się, sprężyny wydłużające się lub kurczące, tłoczki, w których za pomocą elementu SMA wysuwa się tłoczysko.

Do zalet aktuatorów SMA zaliczyć można ich lekkość oraz duży współczynnik siły do masy. Na cięgnię o grubości 0,5mm można zawiesić ciężar 3,5 kg, prostotę realizacji ruchu liniowego – nie wymagają przekładni mechanicznych. Beziskrowość – mogą pracować w środowiskach niebezpiecznych, gdzie silniki elektryczne mogą spowodować wybuch, przy pracy dwustanowej bardzo proste sterowanie załącz/wyłącz. Możliwość pracy równoległej. Materiał ten jest biokompatybilny, znaczy to, że może mieć kontakt z ciałem człowieka przez bardzo długi czas nie powodując żadnych uszkodzeń tkanki. Ta własność powoduje, że jednym z zastosowań, o których będzie mowa niżej jest protetyka. Wady aktuatorów SMA: niska sprawność, niewielka dynamika działania wynikająca z istnienia procesów termicznych – długi czas chłodzenia, wysoka cena praktycznie uniemożliwiająca zastosowanie w konstrukcjach amatorskich.

W zależności od wymaganej dokładności kontrolowania pozycji istnieje sporo metod sterowania. Zaprezentowane są one na rysunku 5. Pierwszą metodą jest metoda dwustanowa załącz/wyłącz.



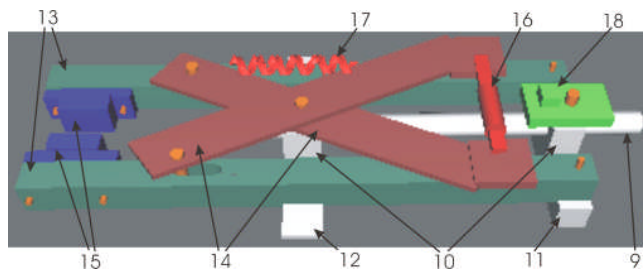
Rys. 5. Metody sterowania aktuatorów SMA.

Metoda ta polega na sterowaniu dwupozycyjnym podobnie jak proste siłowniki pneumatyczne. Aktuator osiąga dwie stabilne pozycje. Wadą tego sterowania jest mała powtarzalność pozycji. Metoda ta jest jednak często stosowana w prostych konstrukcjach. Dodatkowe zabezpieczenia przed przeciążeniem mechanicznym niektórych modeli aktuatorów SMA sprawiają, że stosowanie bardziej skomplikowanych metod mija się z celem. Bardzo skomplikowane metody bazują na modelach matematycznych stopów SMA. Istnieją trzy grupy modeli matematycznych: bazujące na zasadach

termodynamiki, opisie matematycznym właściwości plastycznych i sprężystych, bazujące na podstawowej wiedzy z zakresu mikromechaniki [4]. Przykładowy model matematyczny bazujący na równaniach termodynamicznych znajduje się w [3]. Złożoność modeli sprawia, że do ich implementacji potrzebna jest duża moc obliczeniowa układów sterowania, dodatkowo nie wszystkie parametry modelu dają się wyznaczyć empirycznie, niektóre z nich są parametrami matematycznymi. Ciekawą grupę układów sterowania stanowią układy sieci logiki rozmytej, dokładność sterowania w tym przypadku zależy od wybranego modelu sieci neuronowej. Ostatnią, najnowszą a za razem bardzo ciekawą metodą sterowania jest metoda segmentowa (Segmented Binary Control - SBC). Wykorzystuje ona bardzo nietypową właściwość aktuatora SMA mianowicie bardzo duży opór cieplny. Metoda polega na tym, że aktuator dzieli się na określoną ilość segmentów, które można sterować niezależnie. Sterowanie pojedynczego segmentu odbywa się na zasadzie włącz/wyłącz. Podział aktuatora na segmenty umożliwia uzyskanie tyle stabilnych pozycji, na ile segmentów został podzielony aktuator [5]. Inne metody sterowania bazują na opisie charakterystyki histerezy (rys. 1) lub estymacji temperatury na podstawie pomiaru prądu [6].

Przejdźmy teraz do najciekawszej części – zastosowanie stopów SMA w robotyce. Wachlarz zastosowań jest bardzo szeroki. Od chwytaków oraz robotów kroczących typu hexapod po stacjonarne i mobilne roboty o wielu stopniach swobody. Są to roboty naśladowujące ludzką mimikę, roboty wężopodobne, roboty sieciowe. Te ostatnie stanowią bardzo ciekawą grupę robotów mobilnych. Aby wykonać kontrolowany ruch w jedną stronę muszą wykonać drgania w innej płaszczyźnie, zazwyczaj odwróconej od płaszczyzny ruchu o 90° .

Na rysunku 6 przedstawiona jest końcówka chwytaka. Napędzany jest on za pomocą dwóch elementów SMA tłoka – zapewniającego siłę ściskającą (16) oraz sprężyny powodującej otwieranie



Rys. 6. Chwytnik napędzany aktuatorami SMA. [7]

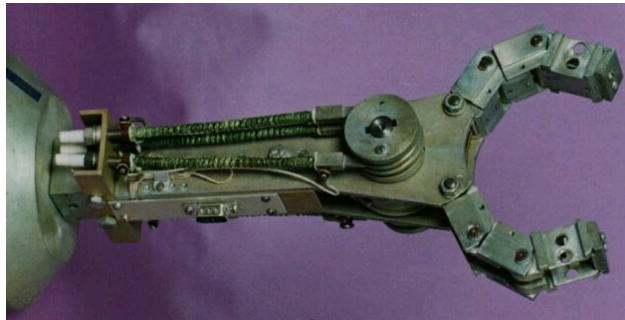
chwytaka (17). Ramiona układu napędowego są wykonane w układzie nożycowym (14), natomiast ramiona chwytne szczypcowym (13). Przejście takie powoduje zwiększenie promienia skrętu szczęk (15). Kolejnym przykładem, przedstawionym na rysunku 7 jest aktuator pozycjonujący kamerę.



Rys. 7. Aktuator kamery przemysłowej. [7]

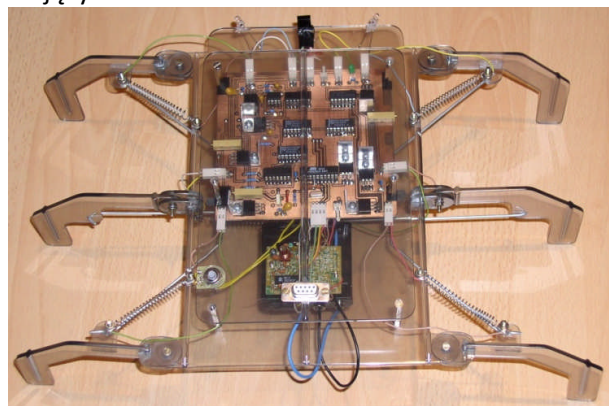
Aktuator ten posiada dwa stopnie swobody. Na następnym rysunku zaprezentowano dwupalczysty chwytnik, który może być protezą ręki. Więcej przykładów jest do znalezienia w Internecie pod hasłami takimi jak: shape memory alloys, SMA, nitinol, do czego serdecznie zachęcam.

Temat aktuatorów SMA jest bardzo szeroki. W artykule tym zawarte są tylko podstawowe informacje dotyczące tej niezwykle i szybko się rozwijającej rodziny materiałów. Mam jednak nadzieję, że są też interesujące. Szkoda, że dostępność i cena aktuatorów SMA stanowią dużą barierę

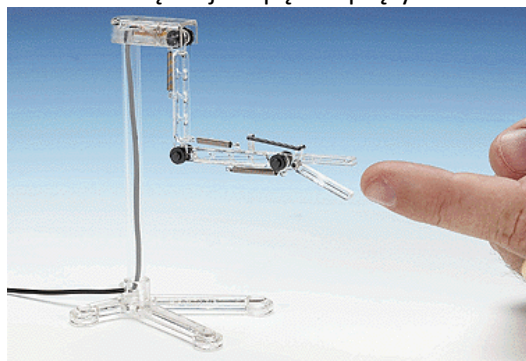


Rys. 8. Chwytnak napędzany aktuatorami SMA. [8]

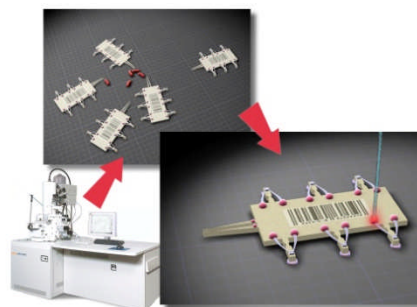
w zastosowaniu ich w projektach amatorskich. Na zakończenie zaprezentuję kilka przykładowych robotów napędzanych SMA bez żadnego opisu, po prostu zdjęcia nazbierane z różnych źródeł, niektórych już nawet nieistniejących.



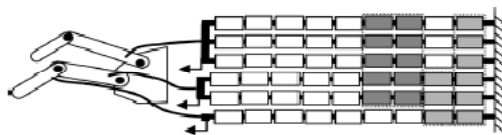
Rys. 9. Robot Hexapod wykonany jako praca dyplomowa magisterska na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Napęd – sprężynki SMA.



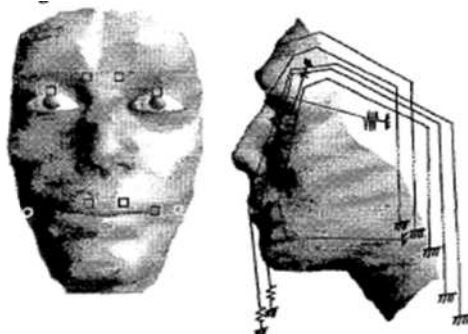
Rys. 10. Robot „Silent Arm”. Napędzany sprężynkami SMA.



Rys. 11. Nanorobot napędzany cięgnami SMA, ciepło dostarczane jest za pomocą laserów.



Rys. 12. Manipulator napędzany cięgnami SMA, sterowany z wykorzystaniem metody SBC [6].



Rys. 13. Sztuczna twarz emulująca mimikę prawdziwej.



Rys. 14. Robot elastyczny wąż.

Bibliografia:

- [1] <http://www.matint.pl/>
- [2] http://www.absoluteastronomy.com/topics/Shape_memory_alloy
- [3] <http://www.smaterial.com/SMA/model/model.html>
- [4] Biereg K.: *Porównanie wybranych równań konstytutywnych stopów z pamięcią kształtu*. Modelowanie inżynierskie, Gliwice 2006.
- [5] Lael U. Odhner, Haruhiko H. Asada: *Sensorless Temperature Estimation and Control of Shape Memory Alloy Actuator Using Thermoelectric Devices*. IEEE ASME Transactions on mechatronics, vol 11, april 2006.
- [6] Selden B., Kyu-Jin Cho, Hary H. Asada: *Segmented Binary Control of Shape Memory Alloy Actuator Systems Using the Peltier Effect*. Proceedings of the 2005 IEEE
- [7] Kciuk M.: *SMA gripper for industrial robot – experimental and calculation results comparison*. VIII Międzynarodowe Warsztaty Doktoranckie OWD'2006, Wisła 21-24 października 2006 r.
- [8] www.shelleys.demon.co.uk/jan02fea.htm