

Marcin LUBIŃSKIPOLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH,
WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ELEKTRONIKI I INFORMATYKI, INSTYTUT AUTOMATYKI**Chwytnak napędzany materiałem z pamięcią kształtu
(Ni-Ti)**

Mgr inż. Marcin LUBIŃSKI

Mgr inż. Marcin Lubiński ukończył w roku 2007 Akademię Górniczo Hutniczą Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, specjalność Robotyka i Mechatronika. Obecnie jest doktorantem na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami robotyki zmierzającymi do utworzenia oprogramowania sterującego robotem przemysłowym na podstawie informacji wizyjnej.



e-mail: marlubin@gmail.com

Streszczenie

Pomimo licznych niespotykanych cech i zalet materiałów z pamięcią kształtu, wykorzystanie ich w profesjonalnych rozwiązaniach wiąże się z licznymi utrudnieniami. W artykule przedstawiono prototypową konstrukcję uniwersalnego chwytaka napędzanego przewodami Nitinolu. Zaprezentowany został projekt chwytaka wraz z analizą kinematyki i sił. Porównano teoretyczne parametry pracy z rzeczywistymi, pochodzącymi z przeprowadzonych badań. Ukazano wyniki problemy, których nie przewidziano na etapie projektu. Przeprowadzono symulacje różnych sposobów zasilania.

Słowa kluczowe: Nitinol, chwytak, pamięć kształtu.

The gripper actuated by shape memory material (Ni-Ti)**Abstract**

Shape memory materials because of their unique characteristics are used in more and more applications. The use of shape memory materials in professional solutions gives a lot of advantages but it is connected also with many difficulties. The paper presents all-purpose prototype gripper actuated by Nitinol wires. The gripper project is shown with kinematic and force analysis. In this paper You can find equations for position jaws the gripper, and formulas for rotations platforms. The gripper scheme with decomposition vectors is shown in Figure 2. In the Figure 1 is shown the gripper 3D model created in dedicated software, Figure 3 presents real gripper with manipulation object. Theoretical working parameters were compared with real ones found from constructed test mechanism. The real shortening Nitinol wire was only 2,4%. It is 40% less than given in information sheets from manufacturer. The problems shown in the article weren't predicted on the design stage. Different types of power supply were simulated.

Keywords: Nitinol, gripper, shape memory, SMA.

1. Wstęp

W artykule przedstawione zostaną rezultaty pracy dyplomowej [1]. Praca ukazuje bardzo duże możliwości stosowania materiałów inteligentnych, a w szczególności metalu z pamięcią kształtu jakim jest Nitinol (Ni-Ti – stop niklu i tytanu), zwraca również uwagę na utrudnienia sterowania napędem nitinolowym. Można w niej znaleźć przydatne informacje i spostrzeżenia dla osób zajmujących się budową chwytaków, w których konstrukcji stosowane są materiały inteligentne.

2. Materiały inteligentne

Aktualnie nie ma powszechnie akceptowanej definicji materiałów inteligentnych, jednak substancje określane tym mianem powinny spełniać trzy podstawowe funkcje:

- 1) czujnika (sensora),
- 2) sterowania (procesora),
- 3) napędu (aktuatora).

Dodatkową właściwością jaką powinny posiadać materiały inteligentne jest cecha sprzężenia zwrotnego pomiędzy tymi funkcjami. Obecnie spotykane jest bardzo zróżnicowane nazewnictwo: intelligent materials, smart materials, multifunctional materials... Znaczenie słowa „inteligent” według słownika „Webster's Third International Dictionary of the English Language” to zespół zdolności umysłowych umożliwiających jednostce sprawne korzystanie z nabytej wiedzy oraz umiejętność zachowania wobec nowych zadań i sytuacji. Uważam, iż znane materiały nie posiadają takich cech i dużo bardziej adekwatnym określeniem jest przymiotnik „smart”, ograniczający w swym znaczeniu funkcję inteligencji do samoczynnego i kontrolowanego dopasowywania właściwości pod wpływem impulsów zewnętrznych. Do grupy „smart materials” można zaliczyć m.in.: ciecze magnetoreologiczne i elektroreologiczne, piezoelektryki, włókna optyczne, metale i polimery z pamięcią kształtu [2].

3. Nitinol (Ni-Ti)

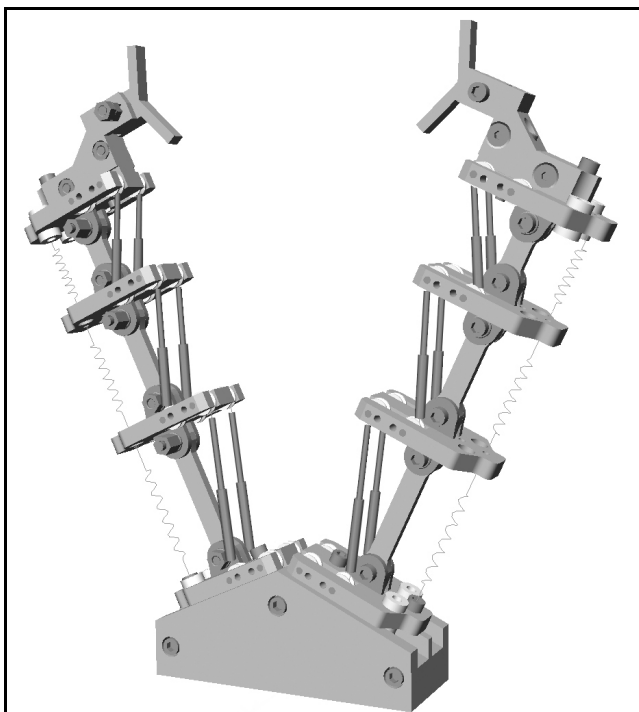
Nitinol jest stopem metali składającym się w głównej mierze z niklu (około 55%) i tytanu, inne pierwiastki dodawane są w śladowych ilościach w celu poprawy własności materiałowych. Nazwa Nitinol jest akronimem od **N**ickiel **T**itanium **N**aval **O**rdnance **L**aboratory. Należy on do grupy metali nazywanych SMA – Shape Memory Alloy (stop z pamięcią kształtu). Nitinol posiada unikalne własności określane jako „shape memory” – pamięć kształtu, opisujące proces przywracania oryginalnego kształtu plastycznie zdeformowanej próbce metalu poprzez jej ogrzewanie powyżej pewnej temperatury. Zjawisko to jest rezultatem przemian fazowych Nitinolu nazywanych także „termoelastyczną przemianą martenzytyczną”. W metalu tym możemy wyróżnić dwie stabilne fazy: fazę austenityczną osiąganą w wyższych temperaturach oraz fazę martenzytyczną tzw. niskotemperaturową. Zmiana fazy austenitycznej na martenzytyczną pod wpływem zmiany temperatury jest zasadniczą cechą determinującą własności stopów z pamięcią kształtu. Nitinol w niskotemperaturowej fazie martenzytycznej może być łatwo deformowalny i zginany, a ryzyko złamania jest znacznie mniejsze niż w przypadku np. stali. Ogrzanie Nitinolu do fazy austenitycznej powoduje powrót do stanu początkowego bez wewnętrznych śladów deformacji [2]. Wyroby ze stopów Ni-Ti mogą się wielokrotnie kurczyć i rozszerzać pod wpływem działania temperatury. Kurczenie się stopów nitinolowych przy dostarczaniu energii cieplnej jest procesem przeciwnym do rozszerzalności cieplnej, którą możemy zaobserwować w większości znanych nauce metali i osiąga dużo większe rozmiary [3]. Średnie skrócenie wyrobów nitinolowych dla ciągłej pracy kształtuje się na poziomie około 4%.

4. Projekt chwytaka

Podjęcie próby zaprojektowania i wykonania chwytaka z wykorzystaniem materiału z pamięcią kształtu miało na celu przetestowanie w praktyce możliwości jakie oferują materiały SMA. Głównymi założeniami konstrukcyjnymi były:

- 1) wykorzystanie do napędu materiału określanego jako „smart”,
- 2) zakres chwytu od 10 mm do 100 mm,
- 3) siła chwytu w przedziale 15 N]- 25 N,
- 4) prosta i lekka konstrukcja.

Rodzaj dobranego napędu ma zasadniczy wpływ na całą konstrukcję chwytaka. Spośród szerokiej gamy wyrobów z materiałów posiadających pamięć kształtu dobrany został przewód nitinolowy. Wybrano Nitinol, gdyż jest on stopem, o którym można uzyskać najwięcej informacji oraz jest łatwo dostępny (m.in. możliwość zakupu na internetowych serwisach aukcyjnych). Dobry przewód o średnicy 0,25 mm jest w stanie wytworzyć dostateczną siłę niezbędną do prawidłowego działania chwytaka, a dzięki małej przekrojowi poprzecznemu bardzo szybko oddaje ciepło do otoczenia, co ma istotny wpływ na częstotliwość pracy. W celu poprawy parametrów pracy chwytaka zastosowane zostały dwa równoległe układy napędowe, dodatkowo każdy przewód nitinolowy nawinięty został na układ rolek. Zabieg ten miał na celu maksymalne wydłużenie części roboczej, aby uzyskać jak największe skrócenie, co przekładało się na skok szczęk chwytanych. Całkowita czynna długość każdego z 4 przewodów wynosi 255,5 mm. Na rysunku nr 1 przedstawiony został model chwytaka wykonany w programie MSC Visual Nastran 4D, aktuatory nitinolowe zostały zasymulowane jako siłowniki liniowe o parametrach pracy dobranych tak, aby najwierniej odwzorować pracę napędu rzeczywistego (na rys. 1 Nitinol przedstawiono jako siłowniki).

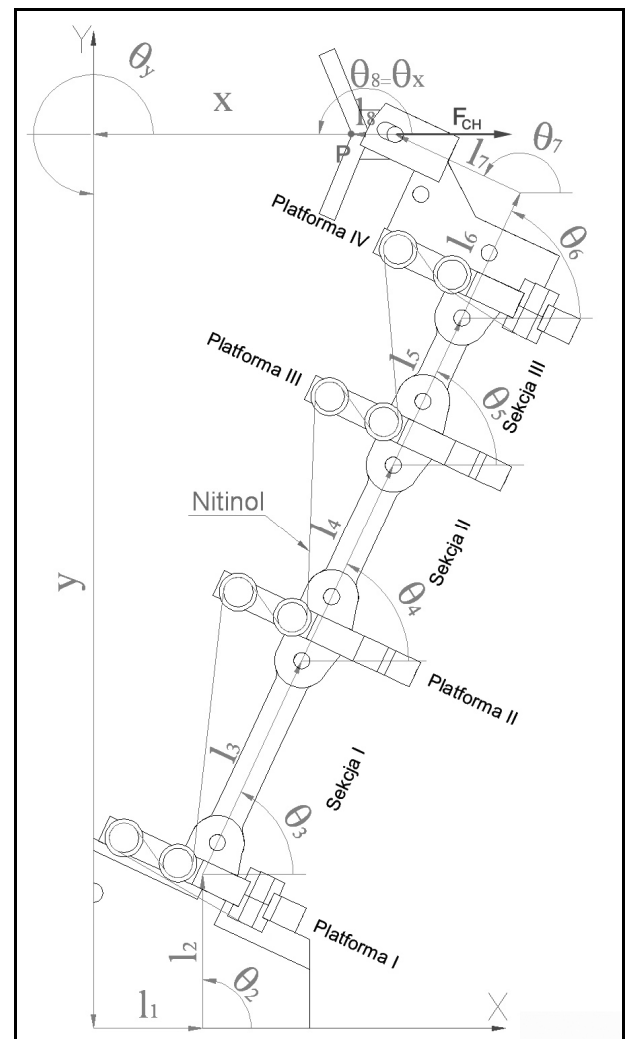


Rys. 1. Model chwytaka wykonany w programie MSC Visual Nastran 4D
Fig. 1. The gripper model created in MSC Visual Nastran 4D software

Do prawidłowego naciągu przewodów Ni-Ti oraz zapewnienia ruchu powrotnego szczęk zastosowany został zestaw 6 sprężyn zwrotnych (rys. 1). Zaprojektowana konstrukcja składa się z dwóch niezależnych ramion osadzonych na wspólnej podstawie. Każde ramie składa się z trzech głównych sekcji osadzonych na platformach (rys. 1). Sekcja następna względem poprzedniej posiada jeden stopień swobody opisany współrzędną kątową $\theta_4 \div \theta_6$ (rys. 2). Kierując się założeniami konstrukcyjnymi takimi jak lekkość konstrukcji oraz prostota wykonania uznano, iż najlepszym materiałem do konstrukcji szkieletu nośnego będą elementy wykonane z aluminium. Kolejnym materiałem wykorzystanym do budowy jest teflon, z którego wykonane zostały elementy mające za zadanie izolację termiczną i elektryczną Nitinolu od pozostałych elementów konstrukcji. Dodatkowymi zaletami teflonu są dobre własności smarujące oraz niska ścieralność. Te parametry zdecydowały o wykonaniu z teflonu rolek na których nawinięty jest przewód nitinolowy.

W celu wyznaczenia współrzędnych położenia szczęk chwytanych należy rozwiązać układ równań algebraicznych dla każdego

ramienia. Równania te opisują zadanie kinematyki prostej za pomocą którego wyliczana jest pozycja punktu charakterystycznego P na szczęce chwytaka (rys. 2). Ze względu na konstrukcję chwytaka końcówki robocze zmieniają swoją pozycję w dwóch wymiarach. Charakterystykę przesunięciową chwytaka opisują dwie zmienne: $x(l)$ i $y(l)$, wartości te określają położenie punktu P względem układu współrzędnych XY zaczepionego w środku dolnej powierzchni podstawy (rys. 2). Zmienną od której uzależnione jest rozwarcie szczęk jest długość przewodu nitinolowego l.



Rys. 2. Schemat ramienia chwytaka z rozkładem wektorów
Fig. 2. The gripper scheme with decomposition vectors

Wyliczenie pozycji chwytaka podzielone zostało na dwa etapy zgodnie z pracą [1], pierwszym jest wyliczenie kątów $\theta_4 \div \theta_6$ (1, 2, 3) pochylenia platform II, III i IV na podstawie procentowego skrócenia długości przewodu napędowego.

$$\theta_4 = 360^\circ - 90^\circ - 115^\circ - \gamma_1 = 155^\circ - \gamma_1 \quad (1)$$

$$\theta_5 = 360^\circ - 90^\circ - 180^\circ + \theta_4 - \gamma_2 = 245^\circ - \gamma_1 - \gamma_2 \quad (2)$$

$$\theta_6 = 360^\circ - \gamma_3 - 90^\circ + \theta_5 - 180^\circ = 335^\circ - \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3 \quad (3)$$

Zależności niezbędne do uzyskania kątów $\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3$ zostały zaprezentowane w pracy [1] w rozdziale 5.4 Kinematyka. W drugim kroku wykorzystując wyliczone wartości katowe uzyskamy położenie szczęk x, y (5). Wzory (5) zostały wyprowadzone z zamkniętego równania wektorowego zrzuconego na osie głównego układu współrzędnych XY (4).

$$\begin{cases} l_1 \cdot \sin \theta_1 + l_2 \cdot \sin \theta_2 + l_3 \cdot \sin \theta_3 + l_4 \cdot \sin \theta_4 + l_5 \cdot \sin \theta_5 + l_6 \cdot \sin \theta_6 + \\ + l_7 \cdot \sin \theta_7 + l_8 \cdot \sin \theta_8 + x \cdot \sin \theta_x + y \cdot \sin \theta_y = 0 \\ l_1 \cdot \cos \theta_1 + l_2 \cdot \cos \theta_2 + l_3 \cdot \cos \theta_3 + l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_5 \cdot \cos \theta_5 + l_6 \cdot \cos \theta_6 + \\ + l_7 \cdot \cos \theta_7 + l_8 \cdot \cos \theta_8 + x \cdot \cos \theta_x + y \cdot \cos \theta_y = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} y = l_2 + l_3 \cdot \sin \theta_3 + l_4 \cdot \sin(155^\circ - \gamma_1) + l_5 \cdot \sin(245^\circ - \gamma_1 - \gamma_1) + \\ + l_6 \cdot \sin(335^\circ - \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3) + l_7 \cdot \sin(425^\circ - \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3) \\ x = l_1 + l_3 \cdot \cos \theta_3 + l_4 \cdot \cos(155^\circ - \gamma_1) + l_5 \cdot \cos(245^\circ - \gamma_1 - \gamma_1) + \\ + l_6 \cdot \cos(335^\circ - \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3) + l_7 \cdot \cos(425^\circ - \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3) - l_8 \end{cases} \quad (5)$$

Wykonana symulacja tak zaprojektowanej konstrukcji potwierdziła przyjęty w założeniach zakres pracy szczęk chwytaka. Przy skróceniu przewodów napędowych do 4% uzyskano zmianę położenia szczęki na osi X w zakresie 50 mm – 8 mm. Dla obydwu ramion daje to możliwość uchwycenia obiektów manipulacji o rozmiarach od 16 mm do 100 mm. W celu wyznaczenia zależności siły jaką wywiera szczeka na uchwycony obiekt przeprowadzona została analiza sił. Dla każdej z 4 platform został zapisany analityczny układ równań sił i momentów. W zapisie tym pominięto siły ciężkości z racji niewielkiej masy chwytaka. Siła generowana przez przewody napędowe zgodnie ze specyfikacją producenta wynosi 9,1 N na każdy przewód. Siły w sprężynach zwrotnych przyjęte zostały na poziomie 2 N. Na podstawie tych informacji wyprowadzony został wzór (6) opisujący siłę chwytu F_{CH} (rys. 2) w zależności od położenia szczęki wynikającego z procentowego skrócenia Ni-Ti. Wektory F_{S3Y} i F_{S3X} są rzutami siły F_{S3} generowanej przez przewody nitinolowe na osie X i Y, a s_3 i t_3 opisują ramię działania

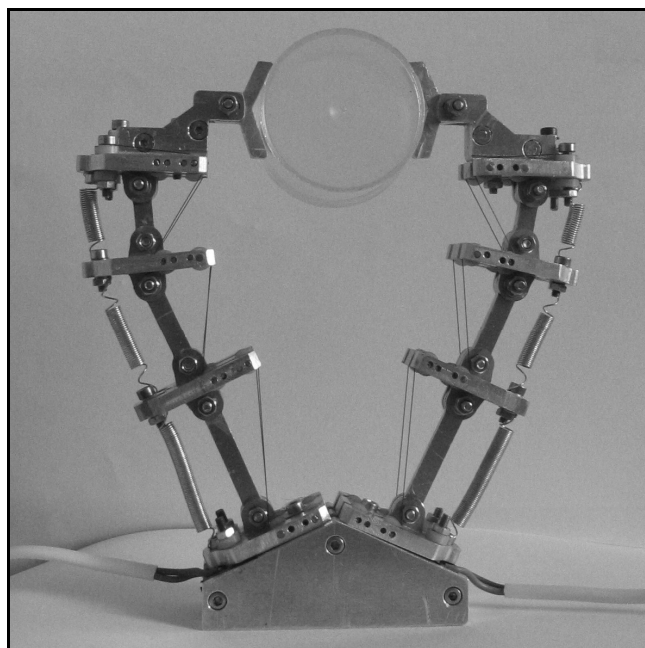
$$F_{CH} = \frac{F_{S3Y} \cdot s_3 + F_{S3X} \cdot t_3 + F_{N3X} \cdot m_3 + F_{N3Y} \cdot (-o_3)}{p_y}, \quad (6)$$

tych sił względem punktu obrotu. Wartości F_{N3Y} , F_{N3X} , m_3 , o_3 analogicznie opisują siłę pochodzącą od sprężyn. Ramię działania siły F_{CH} określa wartość p_y . Parametry te zostały zilustrowane w pracy [1] rozdział 5.5.1. Analiza wykazała, iż każde ramię jest w stanie wygenerować siłę chwytu w granicach od 7 N do 13,5 N, co dla całego chwytaka daje rezultat od 14 N do 27 N.

5. Podsumowanie

Konstrukcja przedstawiona na rys. nr 3 została przetestowana w celu weryfikacji rzeczywistych parametrów pracy. W trakcie wykonywania pierwszych cykli okazało się, że chwytak nie pracuje w pełnym swym zakresie i niemożliwe jest całkowite zamknięcie szczęk. W wyniku przeprowadzonych prób przewodu nitinolowego, rzeczywiste skrócenie ukształtowało się na znacznie niższym poziomie od zakładanego. Uzyskana wartość skrócenia wyniosła jedynie 2,4%, parametr ten jest o 40% mniejszy od deklarowanych 4% przez producenta. Przypuszczalnie mogło to być spowodowane błędem w składzie procentowym składników stopu lub warunkami procesu wytwarzania, które są bardzo istotne podczas produkcji. Wynikły problem niedomykania szczęk został rozwiązany zwiększeniem wstępnego naprężenia przewodów napędowych, co w efekcie zmniejszyło maksymalne rozwarcie szczęk do 65 mm, ale umożliwiło chwytanie przedmiotów o małych gabarytach. W trakcie przeprowadzonych badań potwierdziły się przypuszczenia autorów pracy [1] dotyczące możliwości zadawania na chwytaku położeń pośrednich, a nie tylko pozycji otwartej i zamkniętej. Przepływający przez przewód nitinolowy

prąd, powoduje podwyższenie jego temperatury, którą da się w bardzo ograniczony sposób kontrolować za pomocą zmian natężenia prądu. Zakres prądowy w którym zostały zarejestrowane pośrednie pozycje szczęk wynosi 0,7 A – 1,1 A dla jednego przewodu nitinolowego. Wykonanie niepełnego zamknięcia jest możliwe dzięki faktowi, że Nitinol nie przechodzi z fazy martenzytu do austenitu w sposób nagły lecz proces ten odbywa się stopniowo i możliwe jest uzyskanie przemiany pośredniej, w której część Nitinolu jest jeszcze w stanie martenzytu, a pozostała już w fazie austenitu.



Rys. 3. Chwytak z uchwyconym obiektem manipulacji
Fig. 3. The gripper with manipulated object

Alternatywnym sposobem sterowania chwytakiem jest zastosowanie zasilacza PWM z regulowaną szerokością impulsu. Dodatkowo wykonane próby z wykorzystaniem prądu zmiennego wykazały dużo większą dynamikę działania w porównaniu z prądem stałym. Zaobserwowano wpływ warunków zewnętrznych na działanie przewodów Ni-Ti, nawet niewielka zmiana temperatury otoczenia powodowała występowanie nieprzewidywalnych zachowań. Reasumując Nitinol posiada duże możliwości, jednak trudności w sterowaniu oraz niestabilność pracy ograniczają zakres stosowalności.

Artykuł opublikowany z środków funduszu badań kierunkowych Instytutu Automatyki BK-209/Rau -1/08/t.2.

6. Literatura

- [1] Lubiński M., Warjan P.: Projekt i budowa chwytaka z wykorzystaniem materiałów inteligentnych. Praca dyplomowa Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, Kraków 2007.
- [2] Gandh M.V., Thompson B.S.: Smart Materials and Structures. Chapman & Hall, 1992.
- [3] Pelton A.R., Duerig T.: SMST 2003, Proceeding of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies.